



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

**Títol**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FISURACIÓN  
A BAJAS TEMPERATURAS MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DEL ENSAYO FÉNIX.**

**722-TES-CA-5151**

**Autor/a**

**IRENE ASENSIO SÁNCHEZ**

**Tutor/a**

**FÉLIX EDMUNDO PÉREZ-JIMÉNEZ**

**Departament**

**INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORT I EL TERRITORI**

**Intensificació**

**Data**

**OCTUBRE 2011**



## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesina es el primer paso para finalizar el largo camino que empecé hace unos años, un camino lleno de sacrificios y momentos duros, pero también con muchas experiencias inolvidables.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, el profesor Félix Edmundo Pérez-Jiménez y al profesor José Rodrigo Miró i Recasens, la ayuda, los consejos y la dedicación que me han mostrado en todo momento.

A José Amorós, Jordi Martín e Iván, trabajadores del Laboratorio de Caminos del Departamento de Transportes de la UPC, su ayuda en la fabricación de las probetas y en la realización de los ensayos, y sus consejos y orientación en los problemas que han surgido a lo largo de la tesina.

También agradecer la colaboración del doctorante Ramón Botella, por el interés mostrado y la ayuda prestada a lo largo de toda la tesina.

Y finalmente, a mi familia y amigos, en especial a mis padres y a Xavi, que han sido mi verdadero apoyo durante todos estos años y me han ayudado a seguir adelante.





## **RESUMEN**

**Título:** Evaluación de la resistencia a la fisuración a bajas temperaturas mediante la aplicación del ensayo Fénix.

**Autora:** Irene Asensio Sánchez

**Tutor:** Félix Edmundo Pérez-Jiménez

**Palabras Clave:** resistencia a la fisuración, bajas temperaturas, energía de fractura, tracción directa, deformación por fatiga.

Las solicitaciones producidas por las continuas cargas del tráfico y las condiciones climatológicas dan lugar a un deterioro continuo de las capas bituminosas que se emplean en el firme de una carretera. Estos factores, equivalen a la pérdida estructural y funcional de las carreteras debido a la degeneración de sus propiedades mecánicas.

Uno de los deterioros más frecuentes en las capas bituminosas es el fallo por fisuración que se inicia mediante microfisuras en el material y conforme van progresando, la estructura se debilita, permitiendo la infiltración del agua. Estas consecuencias, conducen a la necesidad de llevar a cabo distintas operaciones de reparación del firme con el fin de devolverle sus características funcionales y estructurales iniciales.

Desde hace muchos años, se han estudiado las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en relación con la fisuración de la propia mezcla, principalmente, a través de varios ensayos experimentales. En esta línea de investigación, el Laboratorio de Caminos de la UPC ha trabajado en el desarrollo de un nuevo ensayo experimental, llamado Fénix, capaz de caracterizar y comprender mejor los mecanismos de deterioro que afectan a las mezclas bituminosas.

En la presente tesina, se pretende evaluar la resistencia a la fisuración a bajas temperaturas mediante la utilización del ensayo Fénix en función del tipo de ligante, de la temperatura de ensayo y de la velocidad de aplicación de carga. También se estudia el comportamiento a fatiga de las mismas mezclas en función del tipo de ligante y de la deformación aplicada, con el objetivo de establecer una comparación entre los parámetros obtenidos mediante los dos ensayos.

Los resultados obtenidos muestran que la mezcla formada por el betún modificado es capaz de alcanzar mayores deformaciones antes de llegar a rotura y presenta un comportamiento más dúctil y tenaz que las mezclas formadas por los betunes convencionales o de caucho, en las mismas condiciones.

En conclusión, el ensayo Fénix permite evaluar la respuesta frente a la fisuración que experimentan las mezclas bituminosas a través de una serie de parámetros (como la energía de fractura o el índice de rigidez a tracción, entre otros), que representan las principales propiedades mecánicas que caracterizan el comportamiento de las mezclas bituminosas desde el inicio de las fisuras hasta la fractura total.



## **ABSTRACT**

**Title:** Evaluation of resistance to cracking at low temperatures by applying the Fénix test.

**Author:** Irene Asensio Sánchez

**Thesis Director:** Félix Edmundo Pérez-Jiménez

**Key words:** cracking resistance, low temperatures, fracture energy, direct tensile, fatigue strains.

The stresses caused by traffic repeated loading and environmental conditions give rise to a continuous distress of bituminous layers used in the sign of a road. These factors are equivalent to structural and functional loss of the roads due to degeneration of mechanical properties.

One of the most frequent distresses in bituminous layers is fatigue cracking, that begins with microcracks in the material and, as they propagate, the structure weakens, allowing water infiltration. These effects lead to the need to carry out various repair operations of the firm back to its initial structural and functional characteristics.

The mechanical properties of bituminous mixtures in relation to the cracking have been studied for many years, basically through experimental testing. In this research line, the Road Research Laboratory of the UPC has worked on the development of a new trial called Fénix, which is able to improve how distress mechanisms that bituminous mixtures.

The aim of this thesis is to evaluate the resistance to cracking at low temperatures using the Fénix test depending on the kind of binder, the test temperature and the rate of load application. We also have studied the fatigue behavior of these same mixtures depending on the kind of binder and the applied strain, in order to establish a comparison between the parameters obtained with both tests.

The results obtained show that the mixture formed by modified bitumen is able to achieving greater deformation before coming to break and it has a more ductile and tenacious behavior than mixtures of conventional and rubber bitumens, under the same conditions.

Summarizing, the Fénix test evaluates the response behind cracking that bituminous mixtures show through a various parameters (such as fracture energy or tensile stiffness index, etc.), which represent the main mechanical properties that characterize the behavior of bituminous mixtures from the beginning of cracks to the total fracture.



**ÍNDICE**

<b>Capítulo 1. Introducción y objetivos.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Metodología de trabajo .....	3
 <b>Capítulo 2. Estado del arte.....</b>	 <b>5</b>
2.1. Introducción.....	5
2.2. Generalidades .....	5
2.3. Causas de la fisuración debida a esfuerzos térmicos .....	6
2.4. Factores que influyen en la aparición de fisuras transversales.....	7
2.5. Tipos de ensayos.....	9
2.5.1. Disk - Shaped Compact Tension Test (DC).....	9
2.5.1.1. Introducción.....	9
2.5.1.2. Elección de la geometría de la probeta.....	10
2.5.1.3. Procedimiento experimental.....	11
2.5.1.4. Resultados del estudio.....	11
2.5.1.5. Ventajas e inconvenientes.....	13
2.5.2. Semi Circular Bending Test (SBC).....	14
2.5.2.1. Introducción.....	14
2.5.2.2. Elección de la geometría de la probeta.....	14
2.5.2.3. Procedimiento experimental.....	14
2.5.2.4. Resultados del estudio.....	15
2.5.2.5. Ventajas e inconvenientes.....	16
2.5.3. Single - Edge Notched Beam (SE).....	16
2.5.3.1. Introducción.....	16
2.5.3.2. Elección de la geometría de la probeta.....	16
2.5.3.3. Procedimiento experimental.....	17
2.5.3.4. Resultados del ensayo.....	17
2.5.3.5. Ventajas e inconvenientes.....	19
2.5.4. Dog - Bone Direct Tension Test (DBDT).....	20
2.5.4.1. Introducción.....	20
2.5.4.2. Elección de la geometría de la probeta.....	20
2.5.4.3. Extracción de muestras.....	20
2.5.4.4. Procedimiento experimental.....	21
2.5.4.5. Ventajas e inconvenientes.....	22

2.5.5. Ensayo Fénix.....	22
2.5.5.1. Introducción.....	22
2.5.5.2. Procedimiento experimental.....	23
2.5.5.3. Resultados del ensayo.....	24
2.5.5.4. Ventajas e inconvenientes.....	26
2.6. Conclusiones.....	27
<b>Capítulo 3. Estudio experimental.....</b>	<b>29</b>
3.1. Introducción.....	29
3.2. Plan de trabajo.....	29
3.3. Materiales empleados.....	31
3.3.1. Áridos.....	31
3.3.2. Betún.....	31
3.4. Granulometría.....	32
3.5. Fabricación de las probetas.....	34
3.5.1. Preparación de los áridos.....	34
3.5.2. Fabricación de las mezclas.....	36
3.5.3. Normas consultadas.....	39
3.6. Determinación de la densidad y el contenido de huecos.....	39
3.6.1. Densidad aparente.....	39
3.6.2. Contenido de huecos.....	41
3.6.3. Normas consultadas.....	43
3.7. Ensayos utilizados.....	43
3.7.1. Ensayo Fénix.....	43
3.7.1.1. Introducción y ámbito de aplicación.....	43
3.7.1.2. Descripción del ensayo.....	44
3.7.1.3. Procedimiento experimental.....	46
3.7.1.4. Normas consultadas.....	48
3.7.2. Ensayo de fatiga en cuatro puntos.....	48
3.7.2.1. Introducción y ámbito de aplicación.....	48
3.7.2.2. Descripción y procedimiento del ensayo.....	49
3.7.2.3. Normas consultadas.....	50
<b>Capítulo 4. Resultados y análisis.....</b>	<b>51</b>
4.1. Introducción.....	51
4.2. Ensayo Fénix.....	51
4.2.1. Densidad aparente y contenido de huecos.....	51

4.2.2. Curvas Tensión - Desplazamiento.....	52
4.2.3. Curvas Tensión - Desplazamiento a -5°C con diferentes velocidades de aplicación de carga.....	55
4.2.4. Estudio de los parámetros obtenidos mediante el ensayo Fénix - Temperatura.....	57
4.2.5. Energía de fractura - Índice de rigidez a tracción.....	61
4.3. Ensayo de fatiga en cuatro puntos.....	62
4.3.1. Densidad aparente y contenido de huecos.....	62
4.3.2. Gráficos Módulo - N° de ciclos hasta el fallo.....	63
4.3.3. Leyes de fatiga.....	66
4.4. Relación entre el ensayo Fénix y el de fatiga.....	67

Capítulo 5. Conclusiones.....	71
-------------------------------	----

Capítulo 6. Bibliografía.....	75
-------------------------------	----

## ANEJOS

**ANEJO 1:** ENSAYO FÉNIX. DATOS EXPERIMENTALES

**ANEJO 2:** ENSAYO FÉNIX. DENSIDADES Y CONTENIDO DE HUECOS

**ANEJO 3:** ENSAYO FÉNIX. CURVAS TENSIÓN - DESPLAZAMIENTO DE LAS PROBETAS  
ENSAYADAS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE ENSAYO Y DE LA VELOCIDAD DE  
APLICACIÓN DE CARGA

**ANEJO 4:** ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS. DATOS EXPERIMENTALES

**ANEJO 5:** ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS. DENSIDADES Y CONTENIDO DE  
HUECOS





## **ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1. 1.</b> Vista en planta de las fisuras transversales [1].....	2
<b>Figura 1. 2.</b> Detalle de una fisura transversal [2].....	2
<b>Figura 2. 1.</b> Geometría recomendada en el ensayo DC [6].....	10
<b>Figura 2. 2.</b> Agrietamiento de la muestra inicial y final [6].....	10
<b>Figura 2. 3.</b> Montaje del experimento de las muestras del ensayo DC [6].....	11
<b>Figura 2. 4.</b> Curvas Carga - CMOD de tres muestras iguales a la temperatura de -10°C [6].....	11
<b>Figura 2. 5.</b> Curvas Carga - CMOD de tres muestras iguales a -20, -10 y 0°C [6].....	12
<b>Figura 2. 6.</b> Tipo de fisuras observadas (tipo I, tipo II y tipo III) [6].....	13
<b>Figura 2. 7.</b> Esquema de la preparación de las muestras SCB [7].....	14
<b>Figura 2. 8.</b> Configuración del ensayo [7].....	15
<b>Figura 2. 9.</b> Gráfico Carga - Desplazamiento [7].....	15
<b>Figura 2. 10.</b> Repetición de probetas a una misma temperatura [7].....	15
<b>Figura 2. 11.</b> Muestra SE con ranura mecánica [8].....	17
<b>Figura 2. 12.</b> Mezclas de cemento asfáltico con tamaño nominal máximo de agregado (NMAS) y el tipo de ligante de asfalto [8].....	18
<b>Figura 2. 13.</b> Curvas Carga - Desplazamiento para una mezcla de 19 mm NMAS a -10°C[8].....	18
<b>Figura 2. 14.</b> Barras de error para las tres pruebas [8].....	18
<b>Figura 2. 15.</b> Curvas Carga - CMOD para la mezcla de 19 mm NMAS a las siguientes temperaturas: -20, -10 y 0°C [8].....	19
<b>Figura 2. 16.</b> Prototipo Dog - Bone Direct Tension Test [9].....	20
<b>Figura 2. 17.</b> Modelo de extracción de muestras [9].....	21
<b>Figura 2. 18.</b> Muestra después de la prueba de resistencia [9].....	21

<b>Figura 2. 19.</b> Representación esquemática del ensayo Fénix y curva Carga - Desplazamiento [10].....	23
<b>Figura 2. 20.</b> Influencia de la velocidad de aplicación de carga en la mezcla S-12 no envejecida (a) y envejecida (b), ensayo Fénix a 20°C [10].....	24
<b>Figura 2. 21.</b> Energía disipada en el proceso de fisuración a diferentes temperaturas de ensayo y diferentes ligantes [10].....	25
<b>Figura 2. 22.</b> Superficies de fisura para la mezcla S-20 a diferentes temperaturas de ensayo [10].....	26
<b>Figura 3. 1.</b> Curva granulométrica de la mezcla de empleo en el ensayo experimental.....	32
<b>Figura 3. 2.</b> Fracciones de árido del proyecto Madison.....	34
<b>Figura 3. 3.</b> Pesado de los áridos para la fabricación de las probetas.....	34
<b>Figura 3. 4.</b> Balanza y bandejas utilizadas en el pesado de los áridos para las placas de fatiga.....	35
<b>Figura 3. 5.</b> Filler pesado en la balanza y colocado en vasos de plástico.....	35
<b>Figura 3. 6.</b> Proceso de fabricación de la mezcla: a) Áridos mezclados en un recipiente metálico sobre la plancha; b) Pesado del betún; c) Mezcla de los áridos con el betún; d) Se añade el filler; e) Comprobación de la temperatura; f) Colocación de la mezcla en el molde.....	36
<b>Figura 3. 7.</b> a) Máquina compactadora (procedimiento Marshall); b) Número de golpes necesarios para la compactación; c) Probeta antes de desmoldar.....	37
<b>Figura 3. 8.</b> Proceso de fabricación de las placas: a) Áridos mezclados en la amasadora; b, c) Vertido de la mezcla en la bandeja metálica; d) Mezcla compactada; e) Placa final.....	38
<b>Figura 3. 9.</b> Máquina compactadora de las placas de fatiga.....	38
<b>Figura 3. 10.</b> Medición de la altura de la probeta con un pie de rey.....	39
<b>Figura 3. 11.</b> Procedimiento experimental para la determinación de las densidades aparentes.....	40
<b>Figura 3. 12.</b> Placa de fatiga sumergida en agua, para calcular la densidad aparente.....	41
<b>Figura 3. 13.</b> Curva Carga - Desplazamiento resultante del ensayo Fénix.....	44

<b>Figura 3. 14.</b> Probetas utilizadas en el ensayo Fénix.....	47
<b>Figura 3. 15.</b> a) Probeta antes de ser sometida al ensayo; b) Probeta después del ensayo; c) Fallo de la probeta.....	47
<b>Figura 3. 16.</b> a) Máquina utilizada en el ensayo Fénix; b) Equipo de adquisición de datos.....	48
<b>Figura 3. 17.</b> Placa y probeta de fatiga.....	49
<b>Figura 3. 18.</b> Máquina de flexión en cuatro puntos.....	50
<b>Figura 4. 1.</b> Curva Tensión - Desplazamiento para el betún B 50/70 (1).....	53
<b>Figura 4. 2.</b> Curva Tensión - Desplazamiento para el betún B 50/70 (2).....	53
<b>Figura 4. 3.</b> Curva Tensión - Desplazamiento para el betún BM3c.....	54
<b>Figura 4. 4.</b> Curva Tensión - Desplazamiento para el betún BC 35/50.....	54
<b>Figura 4. 5.</b> Curva Tensión - Desplazamiento para el betún B 50/70 (1) (-5°C).....	56
<b>Figura 4. 6.</b> Curva Tensión - Desplazamiento para el betún B 50/70 (2) (-5°C).....	56
<b>Figura 4. 7.</b> Curva Tensión - Desplazamiento para el betún BM3c (-5°C).....	56
<b>Figura 4. 8.</b> Curva Tensión - Desplazamiento para el betún BC 35/50 (-5°C).....	56
<b>Figura 4. 9.</b> Carga Máxima vs Temperatura.....	57
<b>Figura 4. 10.</b> Deformación a Carga Máxima vs Temperatura.....	58
<b>Figura 4. 11.</b> Desplazamiento a Rotura vs Temperatura.....	58
<b>Figura 4. 12.</b> Índice de rigidez a tracción vs Temperatura.....	59
<b>Figura 4. 13.</b> Energía de fractura vs Temperatura.....	60
<b>Figura 4. 14.</b> Índice de tenacidad vs Temperatura.....	61
<b>Figura 4. 15.</b> Energía de fractura vs Índice de rigidez a tracción.....	62
<b>Figura 4. 16.</b> Gráfico Módulo - Nº de ciclos hasta el fallo para el betún B 50/70 (1)....	64
<b>Figura 4. 17.</b> Gráfico Módulo - Nº de ciclos para el betún B 50/70 (2).....	64
<b>Figura 4. 18.</b> Gráfico Módulo - Nº de ciclos para el betún BM3c.....	65

<b>Figura 4. 19.</b> Gráfico Módulo - N° de ciclos para el betún BC 35/50.....	65
<b>Figura 4. 20.</b> Ley de fatiga de las cuatro mezclas.....	66
<b>Figura 4. 21.</b> Gráfico Deformación vs $G_F$ .....	68
<b>Figura 4. 22.</b> Deformación vs $\Delta F_{\text{máx}}$ .....	68

## *ÍNDICE DE TABLAS*

<b>Tabla 2. 1.</b> Comparación de las dimensiones de la muestra según la norma ASTM E399 y las recomendadas para el hormigón asfáltico [6].....	10
<b>Tabla 3. 1.</b> Distribución de las probetas utilizadas en los distintos ensayos.....	31
<b>Tabla 3. 2.</b> Características de los betunes.....	31
<b>Tabla 3. 3.</b> Huso granulométrico para mezclas AC22 bin D.....	32
<b>Tabla 3. 4.</b> Granulometría de trabajo para la fabricación de las probetas del ensayo Fénix.....	33
<b>Tabla 3. 5.</b> Granulometría de trabajo para la fabricación de las placas del ensayo de fatiga.....	33
<b>Tabla 4. 1.</b> Densidad aparente, contenido de huecos, desviación típica y coeficiente de variación (valores promedio ensayo Fénix).....	52
<b>Tabla 4. 2.</b> Densidad aparente, contenido de huecos, desviación típica y coeficiente de variación (valores promedio ensayo de fatiga).....	63
<b>Tabla 4. 3.</b> Relación entre el ensayo Fénix y el de fatiga en cuatro puntos.....	67

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Introducción

---

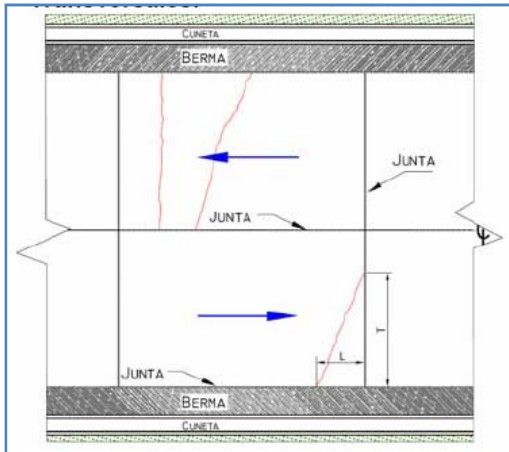
El firme de una carretera es una estructura resistente constituida por capas de pequeño espesor (en relación a su longitud y anchura) y diferentes clases de materiales que son las encargadas de transmitir las solicitaciones producidas por el tráfico pesado a la explanada de la estructura. Una vez el firme se pone en un funcionamiento, poco a poco va perdiendo sus propiedades, resistencia y funcionalidad debido a diversos factores que influyen en su deterioro. Dos de los factores más importantes son las condiciones climatológicas y las cargas del tráfico.

Cada carga del tráfico transmite una sollicitación horizontal y vertical que se manifiestan en el pavimento en forma de fallos producidos por fisuración por fatiga, deformaciones o hundimientos. Sin embargo, la climatología de una zona está asociada a las variaciones diarias y estacionales de la temperatura, a la pluviosidad y a las heladas de una zona, influyendo negativamente en las mezclas bituminosas. Estas variaciones de temperatura producen fallos por fisuración superficial debidos a esfuerzos térmicos o a la pérdida de la capacidad portante de la explanada.

Desde hace muchos años, los agrietamientos producidos en pavimentos sometidos a bajas temperaturas son un grave problema que se producen, principalmente, en países situados en latitudes extremas del norte o del sur, como por ejemplo, Estados Unidos, Alaska o Canadá. Este tipo de grietas se producen cuando las tensiones de tracción se desarrollan en un pavimento compuesto por mezclas asfálticas donde la temperatura desciende a un valor extremadamente bajo, generando una microgrieta en la superficie y en el borde de la estructura del pavimento. En temperaturas más frías o en ciclos repetidos de temperatura, la grieta penetra en profundidad y en anchura de la capa del pavimento. Se trata de grietas transversales a la dirección del tráfico y espaciadas regularmente a intervalos de 30 m en pavimentos nuevos y a menos de 3 m en pavimentos de edad.

Existe una gran relación entre las grietas transversales producidas en el pavimento y las propiedades de los materiales de la superficie ya que las mezclas de superficie están directamente expuestas a la tensión superficial, a la tensión inducida por las cargas del tráfico y a las condiciones ambientales.

Las fisuras transversales ocasionadas a bajas temperaturas han sido investigadas tanto en relación a la rigidez del asfalto como a la rigidez de la mezcla y, generalmente el fisuramiento guarda buena correlación con las dos propiedades. Eso puede ser explicado por la fuerte relación entre el asfalto y el módulo de rigidez de la mezcla.



**Figura 1. 1.** Vista en planta de las fisuras transversales [1].



**Figura 1. 2.** Detalle de una fisura transversal [2].

Actualmente, existen muchos firmes que presentan deficiencias que afectan a la seguridad de la circulación, a la comodidad del usuario y a la durabilidad del firme. Todas estas deficiencias que vienen causadas en mayor parte por las variaciones de temperatura pueden dar lugar a la aparición de grietas en bloque o a escalonamiento debido a la entrada de agua. Estos aspectos conducen a la necesidad de llevar a cabo operaciones de sellado (para niveles de severidad baja o media) y reparaciones en todo el espesor del pavimento (para niveles de severidad altos) con el fin de devolver al firme las características funcionales y estructurales iniciales.

Hoy en día se llevan a cabo y se estudian muchas propuestas, requerimientos de diseño y procedimientos constructivos por diversos organismos de carreteras en todo el mundo, con el objetivo de minimizar los problemas causados por las fisuras transversales en las carreteras debido a las bajas temperaturas. Sin embargo, después del análisis de varios estudios, se ha podido observar que la eliminación de los problemas causados por las fisuras transversales es una tarea demasiado costosa en función de las limitaciones del uso de material y de procedimientos especiales de construcción y de diseño de mezclas. Por lo que se optó por minimizar el problema en vez de eliminarlo, retardando la aparición de fisuras y manteniéndolas en un nivel aceptable.

Por estos motivos, la construcción sostenible de carreteras es, hoy en día, una necesidad, y todos debemos tener conciencia de ello. Con la presente tesina se pretende ampliar el conocimiento y analizar el comportamiento de las mezclas

asfálticas cuando se ven sometidas a cambios bruscos de temperatura, o simplemente, a las condiciones atmosféricas a las que pueda estar sometida.

Para estudiar la problemática se emplean los ensayos Fénix y de fatiga en cuatro puntos que aportan mucha información referente a la resistencia a la fisuración y a la fatiga, respectivamente. Se trata de evaluar las propiedades de diversas mezclas bituminosas sometidas a diferentes temperaturas, concretamente a 20, 5, -5 y -15°C y a diferentes tipos de betún, dos convencionales, el B 50/70 (1) y el B 50/70 (2); un modificado, el BM3c y uno de caucho, BC 35/50, con la finalidad de analizar su comportamiento y asegurar su calidad y características respecto su exposición a las condiciones atmosféricas.

Con este objetivo, se compararán los resultados de la campaña experimental obtenida mediante la utilización del ensayo Fénix, con los resultados de la campaña experimental obtenida mediante la utilización del ensayo de fatiga a flexotracción, todos ellos elaborados en el Laboratorio de Caminos de la UPC de Barcelona.

## 1.2. Objetivos

---

La intención principal de este trabajo es determinar la resistencia a la fisuración a bajas temperaturas de diferentes mezclas bituminosas mediante la aplicación del nuevo ensayo FÉNIX, desarrollado por el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la UPC, comparando esta caracterización con los resultados obtenidos sobre las mismas mezclas a partir de los ensayos normalizados de fatiga a flexotracción.

A su vez, las mezclas bituminosas citadas anteriormente serán sometidas a cuatro tipos de betún diferentes y a diversas temperaturas con el fin de analizar sus propiedades y su comportamiento desde el punto de vista de la carga máxima, de la resistencia a tracción, del desplazamiento a carga máxima y a rotura, del índice de tenacidad y de rigidez a tracción, y de la energía de fractura.

## 1.3. Metodología de trabajo

---

El trabajo realizado se estructura en los siguientes puntos:

- El primer capítulo expone una *introducción* donde se plantea el problema que se estudiará a lo largo de esta tesina y los *objetivos* que se quieren alcanzar mediante la realización de un estudio empírico y experimental.
- El segundo capítulo presenta un *estado del arte* en el que se describen las causas y los factores que contribuyen al aumento de la problemática asociada y se exponen los ensayos anteriormente empleados en la solución del problema.

- El tercer capítulo se centra en la descripción del *estudio experimental*. En este apartado se describe el proceso de fabricación de las probetas de asfalto y los ensayos empleados para la obtención de los resultados.
- En el cuarto capítulo se expone un *análisis de los resultados* en el cual se presentan los resultados obtenidos mediante el estudio experimental y se analiza el comportamiento que tienen las mezclas asfálticas con distintos tipos de betún, cada uno de ellos sometido a cuatro temperaturas de ensayo.
- En el último capítulo, se exponen las *conclusiones*. En este apartado se recogen los puntos más significativos obtenidos a partir del procedimiento experimental y del análisis de los resultados.



## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Introducción

---

Este apartado está destinado a proporcionar un estado del arte obtenido a partir de la búsqueda de estudios, proyectos y publicaciones anteriores referentes a la resistencia a la fisuración de diferentes mezclas bituminosas, prestando especial atención a las investigaciones que incorporan dicha fisuración debida a tensiones térmicas y principalmente a bajas temperaturas.

### 2.2. Generalidades

---

El firme de una carretera está constituido por un conjunto de capas colocadas horizontalmente sobre el terreno y de varios centímetros de espesor, formadas por diferentes materiales y adecuadamente compactadas. Los firmes deben cumplir las siguientes funciones:

- Proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes bajo las repetidas cargas del tráfico a lo largo de un periodo de tiempo suficientemente largo [3].
- Resistir las solicitaciones del tráfico pesado repartiendo las presiones verticales ejercidas por las cargas, para que a la explanada solo le llegue una carga inferior a su capacidad de soporte [3].
- Proteger la explanada de la intemperie y en particular de la acción del agua y su incidencia en la disminución de la resistencia al esfuerzo cortante en suelos, así como de la acción de los ciclos hielo - deshielo [3].

A lo largo de su vida útil, el firme está sometido a diversas solicitaciones que le hacen entrar en carga, generadas por el tráfico y por las variaciones térmicas. Los ciclos de carga y descarga provocarían finalmente la fatiga del firme. La consecuencia

inmediata sería la aparición de diversas patologías que nos informarían de su incorrecto funcionamiento.

En esta tesina se estudiará la resistencia a la fisuración debida a esfuerzos térmicos de los pavimentos flexibles compuestos por una capa base y un pavimento (capa de rodadura y subbase) de mezclas bituminosas.

### 2.3. Causas de la fisuración debida a esfuerzos térmicos

---

La fisuración es una de las causas más comunes en el proceso de fatiga de un firme, aunque es difícil analizar la fisuración de las mezclas bituminosas debido a sus características reológicas y a los distintos factores que contribuyen a la formación de fisuras y a su propagación. Principalmente son de naturaleza mecánica (debido a las cargas del tráfico) o a ciclos ambientales (como la climatología y el envejecimiento de los materiales).

En la presente tesina se estudian los pavimentos sometidos a bajas temperaturas, donde generalmente aparecen discontinuidades superficiales y profundas en la estructura del firme en forma de fisura transversal. Esta tipología de fisuras se reflejan en el pavimento en forma de una línea de rotura transversal al eje de la carretera, debido a la retracción térmica de la capa de rodadura. Las bajas temperaturas producen este tipo de fisura y se manifiestan como líneas de rotura perpendiculares al pavimento que aparecen distanciadas regular o irregularmente y que vienen provocadas por los siguientes mecanismos:

- El esfuerzo inducido por la contracción térmica del pavimento, dando lugar a un fisuramiento superficial que se propaga por toda la capa asfáltica. La fisura se podría iniciar por medio de un choque térmico o por un ciclo de bajas frecuencias a bajas temperaturas [4].
- Un esfuerzo en la capa base podría causar fisuras transversales que se propagarían hasta la superficie del pavimento [4].
- La ocurrencia de fisuras transversales en la subrasante, por contracción de la capa (causada por humedad o variación de temperatura) podría propagarse a través de la estructura del pavimento por movimientos diferenciales y reflejarse en la superficie del pavimento [4].
- La falta de uniformidad en la subrasante puede causar el congelamiento diferencial produciendo fisuras en la superficie del pavimento [4].

Son varios los factores que influyen en la aparición de fisuras transversales debido a bajas temperaturas, entre los cuales destacan:

- Efectos climáticos
- Tipo de subrasante
- Propiedades del asfalto
- Diseño de la mezcla
- Diseño del pavimento y efectos estructurales
- Envejecimiento del pavimento
- Efectos del tráfico

Aunque todos son considerables en la determinación de las fisuras, las propiedades del asfalto influyen fuertemente en el comportamiento del pavimento en lo que se refiere a fisuras transversales debido a bajas temperaturas.

## 2.4. Factores que influyen en la aparición de fisuras transversales

---

Los principales factores que influyen en la formación de fisuras en los pavimentos de cemento asfáltico debido a las bajas temperaturas se pueden clasificar en:

### ➤ **Efectos del material**

Son varios los materiales que pueden afectar el comportamiento térmico de las mezclas asfálticas. Estos factores se exponen a continuación:

- Cemento asfáltico. La relación entre la temperatura y la rigidez del cemento asfáltico es el factor más importante que afecta a las fisuras producidas a bajas temperaturas. La rigidez y la consistencia (es decir, la viscosidad o la penetración) a una temperatura fría y la susceptibilidad a la temperatura (es decir, el rango de consistencia con la temperatura) son las consideraciones más importantes. Una menor viscosidad (o mayor penetración) de cemento asfáltico producirá un menor aumento de la rigidez con la disminución de la temperatura y, por lo tanto, reduce el potencial de las grietas a bajas temperaturas [5].
- Tipo de agregado y gradación. La máxima resistencia al agrietamiento está asociada a los agregados que tienen alta resistencia a la abrasión, bajos ciclos de congelación - descongelación y baja absorción. Los agregados que poseen estas características muestran poca variación en la resistencia a bajas temperaturas. Los agregados de absorción reducen la resistencia a bajas temperaturas debido a que el cemento asfáltico que queda en la mezcla para la vinculación, es menor de lo que sería en una mezcla con un agregado no absorbente. La gradación de los áridos utilizados en la mezcla aparentemente tiene poca influencia en la resistencia en climas fríos, suponiendo que la mezcla está diseñada para proporcionar una resistencia razonable frente a huecos [5].

- Contenido de cemento asfáltico. Los cambios en el contenido de cemento asfáltico, dentro de un rango razonable, no tienen una influencia significativa en el rendimiento de una mezcla sometida a bajas temperaturas. Al aumentar el contenido de cemento asfáltico aumenta el coeficiente de contracción térmica, pero disminuye la rigidez. El efecto que se puede apreciar es que el esfuerzo térmico que se desarrolla es similar al esfuerzo desarrollado antes de que el contenido de cemento asfáltico se hubiese modificado [5].
- Contenido de huecos. El grado de compactación y el contenido relacionado con los huecos y la permeabilidad, no por sí solos, influyen significativamente en las fisuras a bajas temperaturas [5].

➤ **Factores ambientales**

Son varios los factores ambientales que influyen en el agrietamiento de las mezclas sometidas a bajas temperaturas:

- Temperatura. Para una mezcla dada, cuanto más baja es la temperatura superficial del pavimento, mayor es la incidencia del agrietamiento térmico. La temperatura de la superficie del pavimento está relacionada con la temperatura ambiente y la velocidad del viento. La mayoría de las grietas producidas a bajas temperaturas se producen mayoritariamente cuando la temperatura va disminuyendo hasta alcanzar valores situados por debajo del valor de la temperatura de transición vítrea ("*glass transition temperature*") y se mantiene a este nivel durante un período de tiempo [5].
- Velocidad de enfriamiento. Cuanto más rápida es la velocidad de enfriamiento, mayor es la tendencia al agrietamiento térmico [5].
- Edad del pavimento. Cuanto más antiguo es el pavimento, mayor es la posibilidad de un agrietamiento debido a efectos térmicos. Esta situación está asociada con el aumento de la rigidez del envejecimiento del cemento asfáltico. El contenido de huecos de la mezcla puede influir en el envejecimiento de las características. Además, cuanto mayor es el tiempo en servicio del pavimento, la probabilidad de que las bajas temperaturas aparezcan en el pavimento, también aumenta [5].

➤ **Factores de la geometría del pavimento**

Varios factores de la geometría de la estructura pueden afectar a la respuesta al agrietamiento térmico. Estos factores son los siguientes:

- Tipo de explanada. La frecuencia de las grietas debido a bajas temperaturas suele ser mayor para pavimentos en explanadas de arena que en explanadas cohesivas [5].

- Ancho del pavimento. Las pruebas de campo reflejan que las grietas térmicas son menos espaciadas en aceras estrechas que en las amplias. La separación de las fisuras iniciales en carreteras secundarias de 7,3 m de ancho son de aproximadamente 30 m, mientras que para aeropuertos de aviación, con aceras de 15 m hasta 30 m de ancho, el espacio inicial puede ser mayor de 45 m. A medida que aumenta la edad del pavimento, las diferencias entre la distancia entre grietas secundarias y terciarias no son evidentes [5].
- Espesor del pavimento. En general, la capa más gruesa es la de hormigón asfáltico donde menor es la incidencia del agrietamiento térmico [5].
- Defectos de construcción. La compactación con rodillos de acero de las capas de asfalto sometidas a altas temperaturas y baja rigidez de la mezcla, crea defectos transversales. Cuando el pavimento se enfría, las grietas pueden iniciarse debido a estos defectos [5].

## 2.5. Tipos de ensayos

En los últimos años han sido varios los investigadores que han estudiado los conceptos derivados de la mecánica de fractura aplicados en las mezclas bituminosas. La finalidad de estos estudios ha sido investigar sobre las propiedades mecánicas de fractura de las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de nuevos ensayos que permiten obtener parámetros mecánicos que dan información para caracterizar las respuestas de las mezclas bituminosas frente al proceso de fisuración bajo diferentes condiciones, ya sean climáticas, de materiales o de contenido de ligante, entre otras.

### 2.5.1. Disk - Shaped Compact Tension Test (DC)

#### 2.5.1.1. Introducción

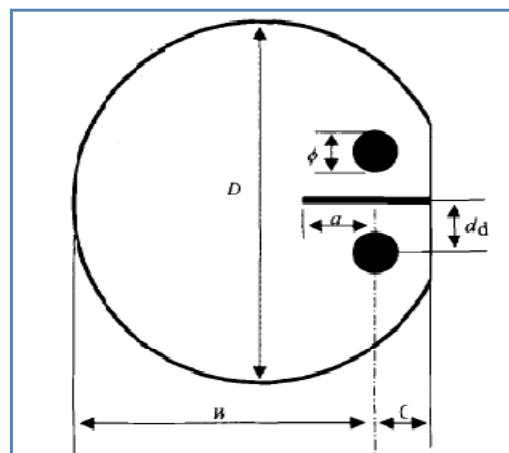
El ensayo Disk - Shaped Compact Tension Test (disco compacto a tracción), desarrollado por Wagoner en la Universidad de Illinois, se basa en la utilización de una probeta de geometría circular para determinar la energía de fractura en las mezclas bituminosas. Para la elección de la geometría cilíndrica se toma como punto de partida la norma ASTM E399 donde se describe la geometría utilizada para obtener el plano de fractura en probetas metálicas.

Se trata de un método práctico para la obtención de la energía de fractura de las mezclas asfálticas a partir de probetas obtenidas mediante testigos cilíndricos de hormigones asfálticos o a partir de muestras giratorias compactadas, fabricadas en el laboratorio durante el proceso de diseño de la mezcla.

### 2.5.1.2. Elección de la geometría de la probeta

En la figura 2.1 se muestra la geometría utilizada en el ensayo, que maximiza la longitud de la sección de fisuración y evita la rotura de la muestra en los agujeros de carga. Las dimensiones resultantes de la probeta se muestran en la tabla 2.1 junto con las dimensiones correspondientes a la norma ASTM E399.

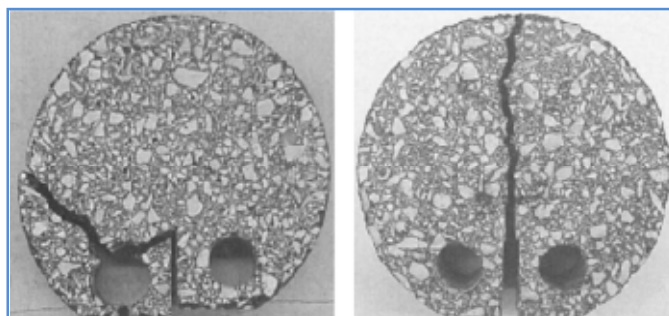
	Dimensions in mm	
	ASTM E399	Recommended for Asphalt Concrete*
$D$	150	150
$W$	111	110
$B_{max}$	56	50
$B_{min}$	28	
$C$	28	35
$\phi$	28	25
$d$	31	25
$a_{max}$	61	
$a_{min}$	50	



**Tabla 2. 1.** Comparación de las dimensiones de la muestra según la norma ASTM E399 y las recomendadas para el hormigón asfáltico [6].

**Figura 2. 1.** Geometría recomendada en el ensayo DC [6].

Inicialmente, en el estudio realizado por Wagoner sobre el desarrollo de la geometría de la probeta, se colocaron los orificios de carga lo más cercano posible a los bordes de la muestra para asegurar una mayor longitud de ligamento, pero esta disposición tenía tendencia al fallo en aproximadamente el 50% de las probetas. Por este motivo, los orificios se desplazaron más hacia al centro de la probeta para asegurar el suficiente material entre los agujeros y el borde y reducir así, el fallo de rotura debido a los orificios. La fiabilidad del ensayo debido a los agujeros aumentó hasta el 80% [6].



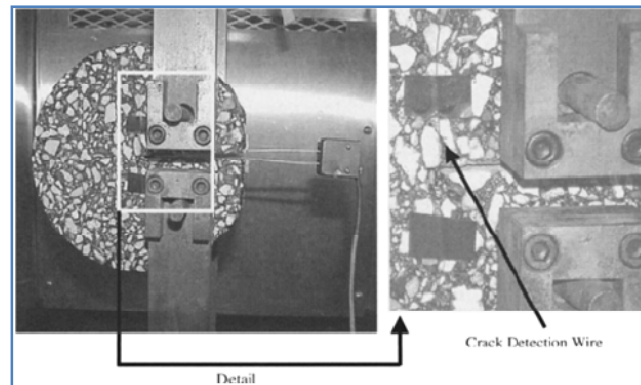
**Figura 2. 2.** Agrietamiento de la muestra inicial y final [6].

Muestra a) Geometría inicial con fractura no deseable.

Muestra b) Geometría final con fractura deseable.

### 2.5.1.3. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental consistió en determinar el potencial de uso del ensayo DC en la obtención de la geometría de fractura del hormigón asfáltico. El diseño experimental desarrollado tenía como objetivo detectar los cambios de energía de fractura a varias temperaturas (-20, -10 y 0°C) y a diferentes velocidades de aplicación de carga (10, 5, 1 y 0,1 mm/min). Se realizaron tres repeticiones para cada temperatura y velocidad, y posteriormente se calculó la energía de fractura media. En la figura 2.3 se muestra el montaje experimental con la carga, los accesorios, la muestra y el calibrage [6].

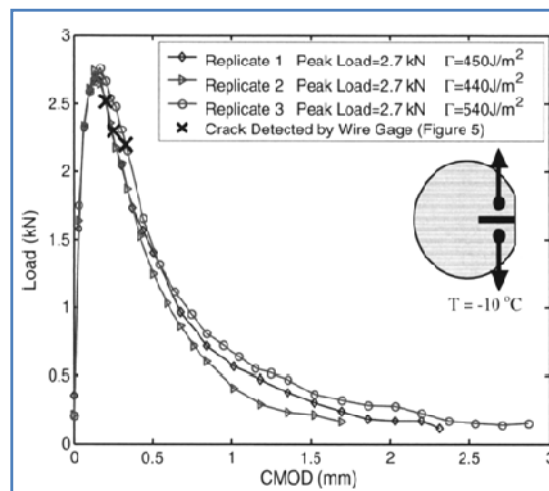


**Figura 2. 3.** Montaje del experimento de las muestras del ensayo DC [6].

En este estudio, la energía de fractura fue calculada como el área bajo la curva Carga - CMOD (desplazamiento de la apertura de fisura) normalizada por el área de la superficie fracturada (longitud inicial del ligamento relacionada con el espesor de la muestra) [6].

### 2.5.1.4. Resultados del estudio

La capacidad de repetición del ensayo y los valores medidos de carga y CMOD influyeron en la energía de fractura. La figura 2.4, muestra las curvas Carga - CMOD para tres repeticiones de probetas a la temperatura de -10°C y 1 mm/min de velocidad de carga [6].



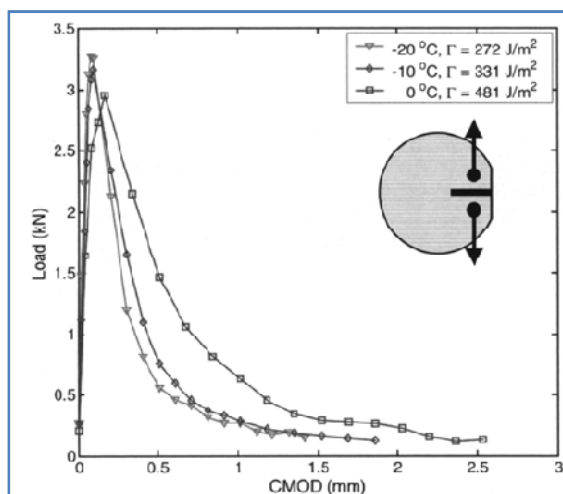
**Figura 2. 4.** Curvas Carga - CMOD de tres muestras iguales a la temperatura de -10°C [6].



Para las tres repeticiones la rigidez inicial es la misma y el pico de carga máxima es muy similar. Las macrofisuras normalmente se producen después de la carga máxima, sin embargo, la microfisuración y algunos daños localizados ocurren a lo largo de la carga, especialmente en la zona de carga máxima. La estructura global podría tener un efecto en la trayectoria de fisura y, por lo tanto, en la respuesta de reblandecimiento [6].

En el estudio se compararon los coeficientes de variación ( $C_v$ ) de la energía de fractura con cada temperatura y con cada carga. En general, el  $C_v$  disminuía conforme aumentaba la temperatura. A bajas temperaturas, es donde los defectos (huecos, agregados débiles, etc.) influyen significativamente en el proceso de fractura. El agrietamiento aparece alrededor de los agregados a altas temperaturas ( $0^\circ\text{C}$ ), mientras que a bajas temperaturas, aparece a través de los agregados. Por lo tanto, las propiedades del asfalto dependen en gran medida de la temperatura [6].

En la figura 2.5, se muestran las curvas Carga - CMOD para una velocidad de carga de  $1\text{ mm/min}$  a tres temperaturas diferentes. La rigidez inicial del material aumenta cuando la temperatura disminuye y también se produce un cambio en la respuesta al reblandecimiento después del pico de carga máxima. La curvatura de la curva de reblandecimiento disminuye cuando la temperatura aumenta, lo que sugiere mayor capacidad de carga, y por lo tanto, más energía total gastada en la deformación [6].



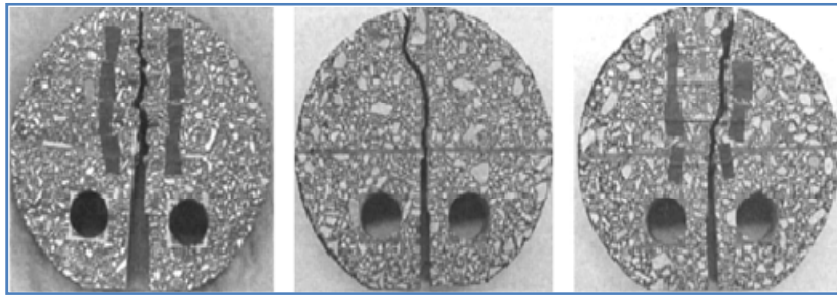
**Figura 2. 5.** Curvas Carga - CMOD de tres muestras iguales a  $-20$ ,  $-10$  y  $0^\circ\text{C}$  [6].

En general, se podría decir que la energía de fractura aumenta cuando la temperatura también lo hace y disminuye al aumentar la carga.

Durante los ensayos se observaron tres tipos de trayectoria en las fisuras, tal y como se muestra en la figura 2.6. El primer tipo de fisura observado es la llamada fisura recta (*tipo I*) que fue la segunda trayectoria de fisura más común. La trayectoria de fisura más frecuente es la llamada *tipo II*, donde la fisura se inicia en un camino recto y a continuación, se desvía en un punto a lo largo del ligamento. La fisura final (*tipo III*) fue la que se inició y se propagó en un ángulo de la entalla. Existen varias causas posibles para el giro y la desviación de la fisura, tales como la presencia de grandes



agregados en la trayectoria de la grieta, la heterogeneidad del material y la excentricidad de carga [6].



**Figura 2. 6.** Tipo de fisuras observadas (tipo I, tipo II y tipo III) [6].

#### *2.5.1.5. Ventajas e inconvenientes*

Las ventajas que se pueden destacar del ensayo DC son las siguientes:

- Su fácil aplicación a testigos y la presencia de un tamaño mayor de área de fractura.
- La fabricación de las probetas es sencilla.
- Tiene la capacidad para capturar la transición del hormigón asfáltico de un material frágil a baja temperatura a un material más dúctil a temperaturas más altas.

Los inconvenientes que presenta el ensayo son:

- En el proceso de fabricación de las probetas se generan microfisuras en los alrededores de los orificios donde se aplica la carga.
- La creación de los agujeros es un proceso de gran dificultad.
- Complejidad en realizar el ensayo a temperaturas superiores a los 10°C.
- En la ejecución del ensayo es posible la desviación de la fisura en algunos casos.
- En el ensayo sólo se puede inducir la propagación de la grieta orientada en el plano del pavimento para secciones delgadas. Aunque algunas grietas pueden propagarse en la otra dirección (hacia arriba o hacia abajo a través del espesor), esto parece ser una circunstancia inevitable cuando se realizan pruebas de DC en pavimentos con capas delgadas.

## 2.5.2. Semi Circular Bending Test (SCB)

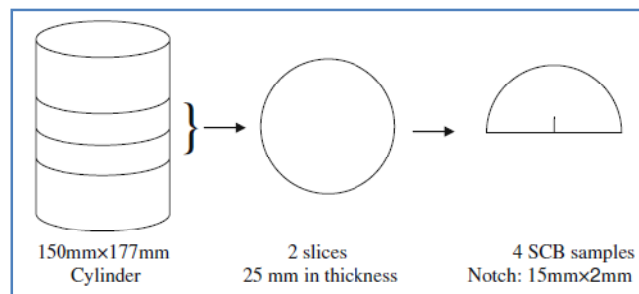
### 2.5.2.1. Introducció

Otro ensayo para medir propiedades de fractura en las mezclas bituminosas es el ensayo de flexión aplicado a una viga semicircular, SCB, desarrollado por Molenaar en la Universidad de Delft. El ensayo también se realiza utilizando tres tipos de velocidad de aplicación de carga diferentes y tres cortes de diferentes longitudes para evaluar la influencia de la velocidad de carga y la longitud del corte en las propiedades de fractura.

#### 2.5.2.2. Elección de la geometría de la probeta

Las probetas utilizadas son obtenidas por medio de la máquina de compactación giratoria. Posteriormente, se realizan cortes de acuerdo al espesor requerido y se seccionan por la mitad obteniendo dos probetas. A cada probeta se le induce una fisura en la mitad de su diámetro.

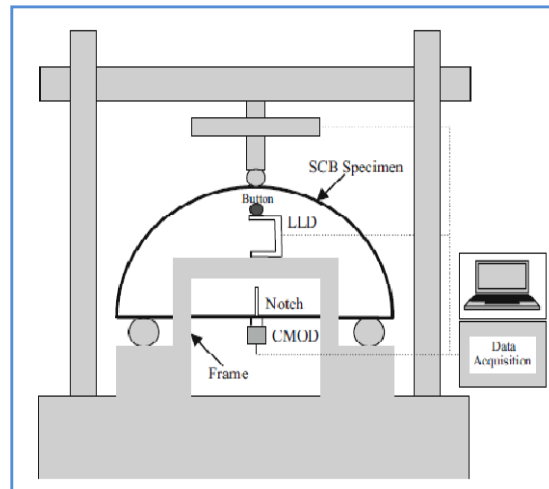
Marasteanu realizó un estudio sobre el ensayo SCB. Para cada una de las mezclas, las muestras cilíndricas se compactaron en el laboratorio con 150 mm de diámetro y 177 mm de altura. Cada uno de los cilindros fue cortado simétricamente por el medio de la muestra SCB en dos rebanadas con 25 mm de altura cada una. Cada rebanada fue dividida en cilindros cortados simétricamente en dos muestras semicirculares con una muesca original de 15 mm de longitud y 2 mm de ancho. El esquema de la preparación de las muestras SCB se presenta en la figura 2.7 [7].



**Figura 2. 7.** Esquema de la preparación de las muestras SCB [7].

#### 2.5.2.3. Procedimiento experimental

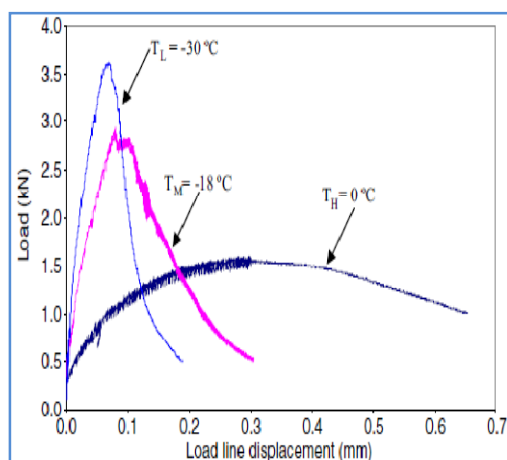
El esquema del ensayo SCB se muestra en la figura 2.8, en la cual la probeta es simétricamente soportada por dos cilindros en la parte inferior y luego se aplica la carga en el centro de la parte superior, con una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min. En el ensayo se registra la carga y la deflexión (desplazamiento del pistón). Los resultados de energía de fractura se calculan mediante el trabajo disipado en el proceso de fractura obtenido de la curva Carga - Desplazamiento resultante.



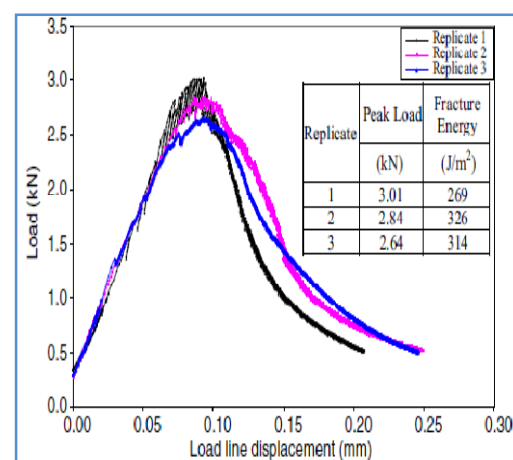
**Figura 2. 8.** Configuración del ensayo [7].

#### 2.5.2.4. Resultados del estudio

En el estudio desarrollado por Marasteanu de la Universidad Minnesota, se fabricaron un total de 90 probetas de SCB de seis mezclas diferentes. En la siguiente figura (figura 2.9) se muestra un gráfico Carga - Desplazamiento a las tres temperaturas estudiadas ( $-30$ ,  $-18$  y  $-6^{\circ}\text{C}$ ). Las seis mezclas estudiadas mostraron un cambio similar en su comportamiento respecto a la carga y a la temperatura. Cuanto más alta es la temperatura, las mezclas asfálticas son más dúctiles y tienen un valor del pico de carga menor y mayor desplazamiento. Cuando la temperatura es más baja, las mezclas son más frágiles y tienen altos picos de carga y poca capacidad de deformación. En la figura 2.10, se muestra como las tres repeticiones de una misma mezcla a la misma temperatura, tienen un comportamiento inicial, unos picos de carga y una curva de reblandecimiento similar, hecho que demuestra que la prueba de repetición fue razonable. La energía de fractura se calculó para todas las mezclas y todas las temperaturas. Todos los valores del coeficiente de variación ( $C_v$ ), tanto para la energía de fractura como para la carga máxima fueron menores al 25%. Este valor indica una repetición satisfactoria del ensayo [7].



**Figura 2. 9.** Gráfico Carga - Desplazamiento [7].



**Figura 2. 10.** Repetición de probetas a una misma temperatura [7].

#### *2.5.2.5. Ventajas e inconvenientes*

Las ventajas que se pueden destacar del ensayo SCB son las siguientes:

- Su fácil aplicación a testigos y a probetas.
- De un testigo se pueden obtener dos muestras, reduciendo con esto las muestras a fabricar o los testigos a extraer para realizar el ensayo.
- Requiere un menor número de muestras por su geometría.

Los inconvenientes que presenta el ensayo son:

- La forma de la aplicación de la carga produce un complejo estado tensional que afecta al proceso de propagación de la fisura, generando un efecto arco con altos esfuerzos de compresión en la localidad cercana a la fisura.

### **2.5.3. Single - Edge Notched Beam (SE)**

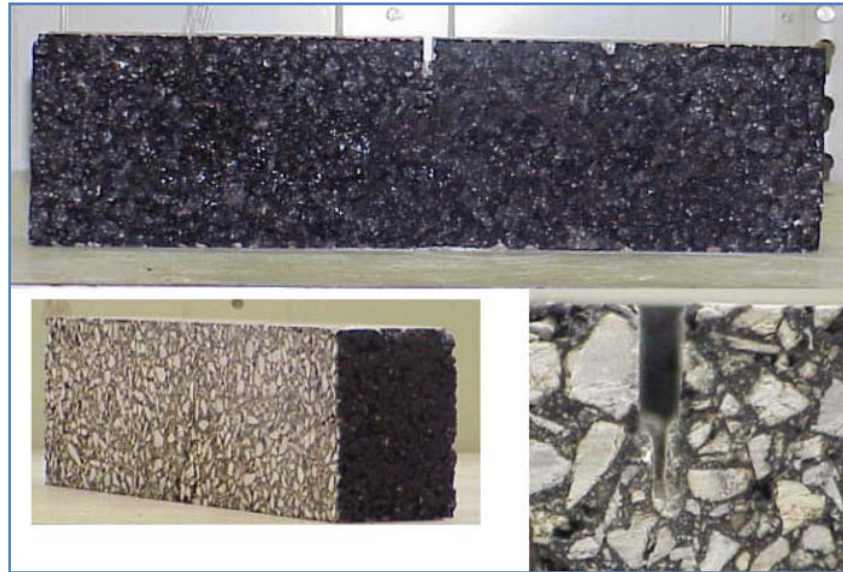
#### *2.5.3.1. Introducción*

El ensayo Single - Edge Notched Beam (viga entallada a flexotracción) se ha utilizado en varios estudios para determinar las propiedades de fractura de las mezclas bituminosas. El análisis de los datos experimentales permite evaluar el comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas determinando parámetros de la mezcla como la energía de fractura. El ensayo SE se aplica a mezclas de materiales cuasi-frágiles. En los pavimentos de hormigón asfáltico la zona del proceso de fractura contiene microfisuras y deslizamiento.

#### *2.5.3.2. Elección de la geometría de la probeta*

La geometría del ensayo SE proporciona una adecuada propagación de la fisura de acuerdo al modo I de fractura. Sin embargo, su geometría tiene la desventaja que no es una probeta estandarizada.

Wagoner, de la Universidad de Illinois, realizó un estudio del ensayo donde las probetas, una vez compactadas, se cortaron dejando unas dimensiones finales de 375 mm de largo por 100 mm de alto y 75 mm de ancho (figura 2.11). A continuación se realizó una ranura mecánica de 19 mm de profundidad [8].



**Figura 2. 11.** Muestra SE con ranura mecánica [8].

A la probeta se le realizó una pequeña ranura mediante la utilización de un elemento metálico, en lugar de utilizar una inserción metálica en el molde de fabricación de la mezcla, con el objetivo de no afectar a la compactación de la muestra. La desventaja de cortar la muesca mecánicamente es que la entalla resultante es demasiado grande en comparación a una obtenida mediante un inserto de metal [8].

#### *2.5.3.3. Procedimiento experimental*

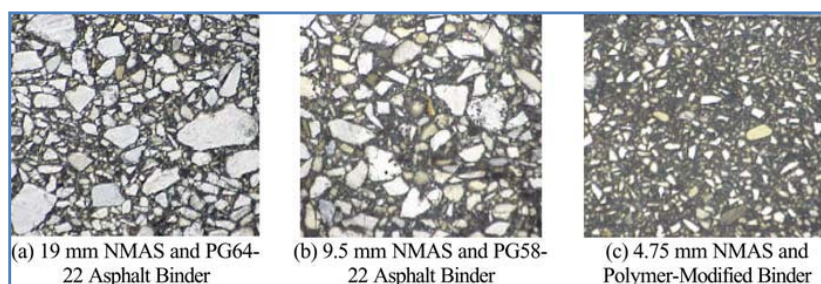
Su metodología consiste en la aplicación de una carga centrada en la cara opuesta de la cara fisurada de una probeta prismática con el objetivo de evaluar la respuesta de la mezcla bituminosa en función de la temperatura de ensayo y la velocidad de aplicación de carga. El análisis de los datos experimentales permite evaluar el comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas determinando parámetros de la mezcla como la energía de fractura.

En el estudio realizado por Wagoner, los ensayos se realizaron a bajas temperaturas (0, -10 y -20°C) por dos razones principales: para inducir un comportamiento frágil y reducir los efectos viscoelásticos. Las probetas se colocaron en la cámara de refrigeración 3 horas antes del comienzo de la prueba para asegurar que la temperatura fuera uniforme a lo largo de la probeta.

#### *2.5.3.4. Resultados del ensayo*

El principal objetivo de los ensayos de fractura en este estudio fue determinar la energía de fractura de las mezclas asfálticas para obtener datos de Carga - CMOD. La energía de fractura se calculó como el área bajo la curva de Carga - CMOD normalizada por la longitud del ligamento inicial y el ancho de la probeta.

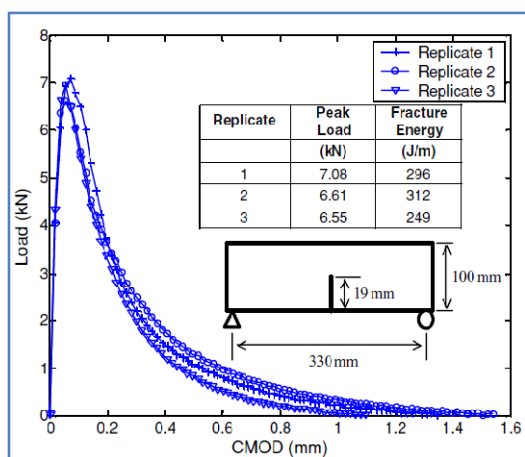
Para el estudio se utilizaron tres mezclas asfálticas, cada una con un tamaño máximo de agregado diferente (NMAS) y un ligante asfáltico.



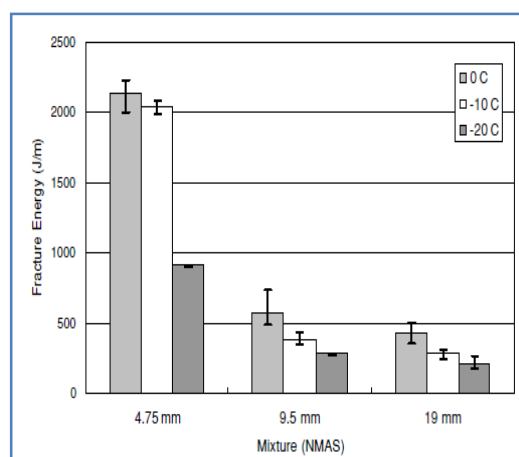
**Figura 2. 12.** Mezclas de cemento asfáltico con tamaño nominal máximo de agregado (NMA) y el tipo de ligante de asfalto [8].

Seguendo los procedimientos del ensayo descritos anteriormente, se ensayaron varias probetas para investigar el desarrollo de las fisuras en las mezclas asfálticas. La macrofisura se inicia a partir de la ranura mecánica poco después de llegar a carga máxima y se propaga siguiendo una trayectoria vertical desde la punta de la ranura. El frente de la grieta no parece ser uniforme a través del espesor de la probeta. Cuando la fisura llega al punto medio del ligamento, la carga se reduce a aproximadamente el 15% del pico de carga [8].

Para cada mezcla y temperatura, se ensayaron tres probetas con el fin de evaluar la capacidad de repetición del ensayo. La figura 2.13 muestra las curvas de Carga - Desplazamiento para tres réplicas de 19 mm mezcla NMA a  $-10^{\circ}\text{C}$ . Las tres réplicas mostraron un comportamiento inicial similar, parecidos valores de picos de carga, y curvas de reblandecimiento. Para cada mezcla y temperatura, se obtuvo el promedio de las tres repeticiones junto con los valores máximo y mínimo de la energía de fractura, trazadas como las barras de error en la figura 2.14. El aumento de la energía de fractura a medida que aumenta la temperatura se puede atribuir a un camino de fisura sinuoso. A medida que aumenta la temperatura, la diferencia entre la fuerza del ligante asfáltico y los agregados aumenta, lo que produce que la fisura se mueva por los agregados [8].



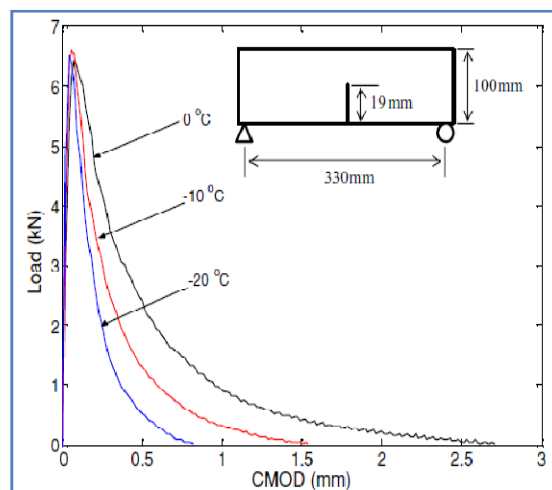
**Figura 2. 13.** Curvas Carga - Desplazamiento para una mezcla de 19 mm NMA a  $-10^{\circ}\text{C}$  [8].



**Figura 2. 14.** Barras de error para las tres pruebas [8].



Mediante el estudio se pudo demostrar el efecto de la temperatura en las propiedades de fractura del cemento asfáltico a  $-20$ ,  $-10$  y  $0^{\circ}\text{C}$ . La figura 2.15 muestra las curvas de Carga - CMOD para la mezcla de 19 mm NMAS a estas tres temperaturas. El comportamiento inicial y las cargas máximas para estas temperaturas son muy similares. Sin embargo, la temperatura afecta a la fragilidad de las mezclas, como se muestra en las curvas de reblandecimiento. La energía de fractura también disminuye a medida que la temperatura disminuye para todas las mezclas. La fragilidad del material es cada vez mayor. La figura 2.15 muestra que el efecto de la temperatura es el mismo para todas las mezclas, sin embargo, la mezcla de 4,75 mm NMAS produce la energía de fractura más alta en todas las temperaturas, mientras que la de 19 mm NMAS produce la energía de fractura más baja en todas las temperaturas. Las diferencias entre la energía de fractura pueden ser debidas a dos motivos. En primer lugar, la NMAS afecta a la energía de fractura mediante la creación de grandes discontinuidades como más grandes son los agregados utilizados. En segundo lugar, el tipo de ligante de asfalto también puede afectar a la energía de fractura por tener diferentes propiedades (adhesión, ductilidad, etc.). La mezcla de 4,75 mm NMAS utiliza un polímero como ligante (ligante modificado), que es mucho más dúctil que los convencionales, utilizados en las demás mezclas [8].



**Figura 2. 15.** Curvas Carga - CMOD para la mezcla de 19 mm NMAS a las siguientes temperaturas:  $-20$ ,  $-10$  y  $0^{\circ}\text{C}$  [8].

#### 2.5.3.5. Ventajas e inconvenientes

Las ventajas que se pueden destacar del ensayo SE son las siguientes:

- La geometría de la probeta proporciona una adecuada propagación de la fisura de acuerdo al modo I de fractura.

Los inconvenientes que presenta el ensayo son:

- Presenta probetas no estandarizadas, lo que limita su aplicabilidad a vigas compactadas o testigos (debido al tamaño de las probetas).

## 2.5.4. Dog - Bone Direction Test (DBDT)

### 2.5.4.1. Introducció

El ensayo Dog - Bone Direction Test, DBDT, ha sido desarrollado recientemente por la Universidad de Florida. Se trata de un ensayo que se utiliza para evaluar las propiedades de tracción de las mezclas asfálticas. A través de este procedimiento se pueden obtener parámetros de fractura y rigidez, y permite evaluar el comportamiento a la fisuración de las mezclas bituminosas. Para ello es necesario el diseño de la mezcla, el control de calidad, y por lo tanto el diseño del pavimento.

### 2.5.4.2. Elección de la geometría de la probeta

En el estudio realizado por Koh de la Universidad de Florida, se refleja el sistema completo del ensayo DBDT que se compone de varias piezas. En la siguiente figura se puede observar una típica probeta de mezcla asfáltica fabricada con el sistema DBDT [9].



**Figura 2. 16.** Prototipo Dog - Bone Direct Tension Test [9].

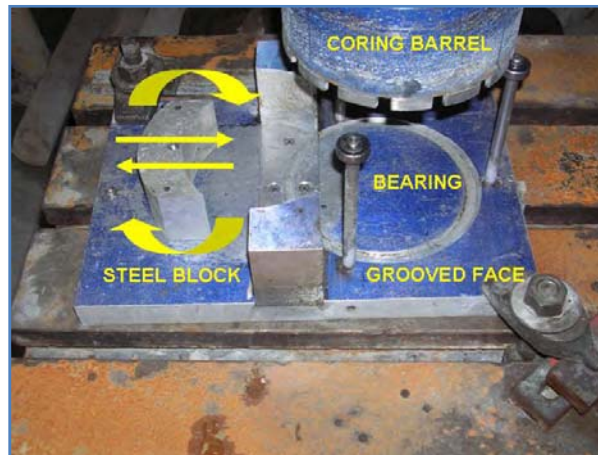
El procedimiento DBDT fue desarrollado con la finalidad de reducir y mejorar las desventajas de los ensayos usuales de tracción directa. El ensayo tiene como objetivo proporcionar la resistencia a tracción para definir completamente el comportamiento a fractura.

### 2.5.4.3. Extracción de muestras

Se utiliza una plantilla de perforación de muestras para que estas tengan forma de “hueso de perro”. En la siguiente figura se muestran los aparatos utilizados para adquirir las muestras. El barril de perforación de la máquina de extracción de muestras empuja hacia abajo sobre una muestra de asfalto y el accesorio de extracción de muestras está equipado con un bloque de acero redondeado y regulable lo que restringe a la muestra lateralmente para dar cabida a diferentes muestras según el



diámetro. Una llave hexagonal hace que la muestra queda exactamente centrada en el accesorio de extracción de muestras [9].



**Figura 2. 17.** Modelo de extracción de muestras [9].

#### *2.5.4.4. Procedimiento experimental*

En el estudio realizado por Koh, se demostró que para el ensayo de resistencia, el factor más importante es detectar el instante de la fractura para determinar la verdadera fuerza de tracción de la mezcla. La fractura se produce por el borde o en ambos extremos al mismo tiempo en el sistema DBDT. El instante de fallo puede ser detectado examinando la diferencia entre las deformaciones de la cara media y cada una de las deformaciones del borde, ya que el primer fallo se produce en el lugar del ritmo de aumento de la deformación [9].

La muestra se rompe en el centro. El análisis del ensayo indica que el sistema DBDT con factores de corrección validados, puede medir con precisión los daños a la tracción y las propiedades de fractura de las mezclas asfálticas [9].



**Figura 2. 18.** Muestra después de la prueba de resistencia [9].

El impulso principal para el desarrollo del ensayo DBDT fue la necesidad de un ensayo adecuado para evaluar las propiedades de tracción de las mezclas asfálticas.

#### *2.5.4.5. Ventajas e inconvenientes*

Las ventajas que se pueden destacar del ensayo DBDT son las siguientes:

- El plano de rotura se conoce a priori y las concentraciones de la tensión cerca de la cabeza de carga tienen un mínimo efecto en los resultados. Los límites de fallo se pueden medir directamente en el plano de fractura.
- Las muestras utilizadas en el ensayo se obtienen perforando los lados opuestos en rebanadas o discos de las muestras, obtenidas a partir de muestras de laboratorio cilíndricas o de testigos de campo.
- Debido a la geometría de la muestra, las concentraciones de tensión cerca de los extremos de la muestra son menos críticos.
- Utiliza un sistema de doble carga del cilindro mediante el cual se carga uniformemente la muestra y se reduce la excentricidad de carga.

Los inconvenientes que presenta el ensayo son:

- La metodología de fabricación de las probetas y los complejos equipos requeridos dificultan una aplicación práctica de este ensayo.
- La probeta está sometida a una carga de compresión y la tracción generada es de forma indirecta. Solo se calcula la resistencia que ofrece la probeta ensayada, despreciando por completo otros posibles parámetros determinantes para analizar los comportamientos generados en el proceso de fisuración.

### **2.5.5. Ensayo Fénix**

#### *2.5.5.1. Introducción*

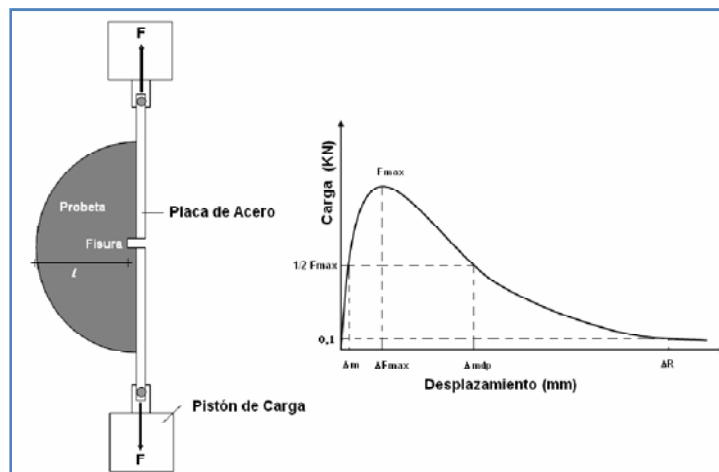
En los pavimentos asfálticos existen varios factores que colaboran en la generación de las fisuras y contribuyen a su propagación. Los factores que producen los mecanismos de fisuración son generalmente de tipo medioambiental (ciclos térmicos) y de tipo mecánicos (cargas debidas al tráfico). Estos factores activan mecanismos como la fisuración.

El ensayo Fénix es un nuevo ensayo desarrollado por el Departamento del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Catalunya, para la caracterización de las mezclas bituminosas frente a la fisuración. El Ensayo Fénix, evalúa distintos parámetros obtenidos al someter una probeta semicircular a una fuerza de tracción de forma directa, provocando su agrietamiento hasta la rotura.

### 2.5.5.2. Procedimiento experimental

Pérez-Jiménez de la Escuela de Caminos de la UPC de Barcelona y su equipo desarrollaron un procedimiento experimental que consistió en ensayar media probeta cilíndrica con una fisura inducida de 6 mm de longitud fabricada mediante el procedimiento Marshall o mediante el compactador giratorio, a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante y a una temperatura deseada. Una vez la probeta ya estaba lista, se fijaba a una placas de acero por las dos secciones de la cara plana y por la entalladura. Esta placa, a su vez, se fijaba a la prensa que permitía un movimiento de rotación respecto a las fijaciones [10].

Durante la ejecución del ensayo se registraron mediante un equipo de adquisición de datos las cargas generadas en función del desplazamiento, para posteriormente calcular los parámetros vinculados a la fisuración. A continuación, se muestra un esquema del ensayo y la curva de salida en la cual se grafica el desplazamiento en el eje de abscisas y la carga en el eje de coordenadas.



**Figura 2. 19.** Representación esquemática del ensayo Fénix y curva Carga - Desplazamiento [10].

La aplicación del ensayo Fénix se realizó a distintos tipos de mezcla para evaluar el comportamiento mecánico de estas y la sensibilidad del ensayo frente a diferentes variables:

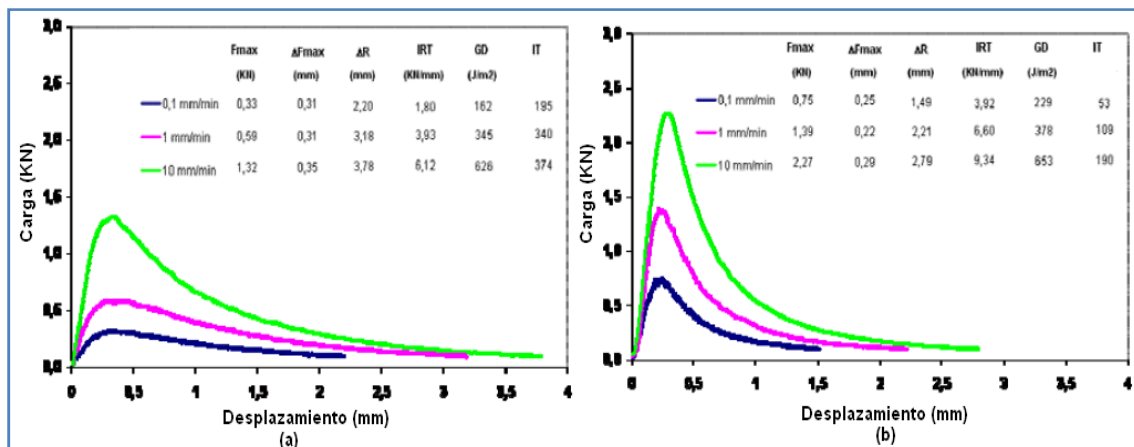
- Velocidad de aplicación de carga
- Envejecimiento
- Tipo de ligante
- Temperatura de ensayo

En el estudio se analizaron las siguiente mezclas: S-12 y S-20 formadas por diferentes ligantes (tres convencionales pero de diferente penetración y uno modificado) y se analizaron a diferentes temperaturas de ensayo (-10, 5 y 20°C) [10].

### 2.5.5.3. Resultados del ensayo

- Efecto de la velocidad de carga y del envejecimiento

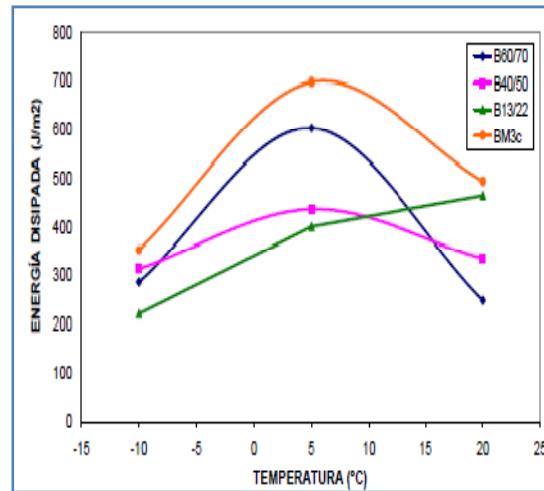
En la figura 2.20 se muestran las curvas Carga - Desplazamiento para una mezcla S-12 sin envejecer y otra envejecida obtenidas a partir del ensayo Fénix a 20°C a diferentes velocidades de aplicación de carga. Las dos mezclas presentan un comportamiento más rígido (mayor  $I_{RT}$ ) a medida que aumenta la velocidad de aplicación de carga, y presentando una mayor energía disipada en el proceso de fisuración,  $G_D$ . Las probetas envejecidas mostraron un comportamiento más frágil que las no envejecidas, cosa que queda reflejada al aumentar los valores del índice de rigidez,  $I_{RT}$ , y al disminuir los desplazamientos de rotura,  $\Delta_R$ , para iguales velocidades de aplicación de carga. Si se compara el índice de tenacidad,  $I_T$ , para cualquier velocidad de carga se observa una pérdida de tenacidad que sufre la mezcla envejecida [10].



**Figura 2. 20.** Influencia de la velocidad de aplicación de carga en la mezcla S-12 no envejecida (a) y envejecida (b), ensayo Fénix a 20°C [10].

- Efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo

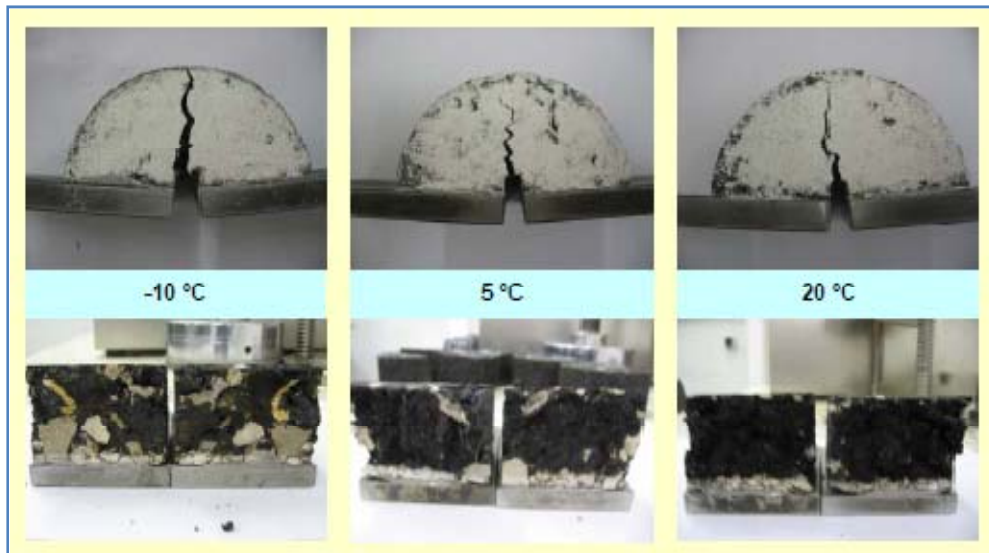
En la figura 2.21 se han representado los resultados de la energía disipada en el proceso de fisuración. Se puede observar que la mezcla que utiliza el ligante modificado (BM3c) ha obtenido el valor más alto de energía disipada en todas las temperaturas ensayadas presentando un mejor comportamiento a la fisuración [10].



**Figura 2. 21.** Energía disipada en el proceso de fisuración a diferentes temperaturas de ensayo y diferentes ligantes [10].

Cabe destacar que a bajas temperaturas,  $-10^{\circ}\text{C}$ , las mezclas presentaron un comportamiento frágil, con altas cargas máximas y bajos desplazamientos de rotura. A temperaturas medias de ensayo,  $5^{\circ}\text{C}$ , se observó un comportamiento intermedio, y a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  se observó un comportamiento más dúctil con altos valores de desplazamiento de rotura,  $\Delta_R$ , y bajos valores de carga máxima,  $F_{\text{máx}}$  y rigidez,  $I_{\text{RT}}$ . En cuanto lo que se refiere a la tenacidad,  $I_T$ , de las mezclas se observa que a bajas temperaturas,  $-10^{\circ}\text{C}$ , todas las mezclas tienen un comportamiento similar, mostrando una baja tenacidad, pero a medida que la temperatura aumenta, la mezcla fabricada con el ligante modificado aumenta su tenacidad respecto a las otras mezclas (10). La repetibilidad del ensayo se evaluó con el coeficiente de variación ( $C_V$ ) calculado para cada serie de probetas. Para los parámetros de energía disipada,  $G_D$ , y carga máxima a tracción,  $F_{\text{máx}}$ , se obtuvieron valores medios de  $C_V$  de 12% y 7% respectivamente. Con estos valores se puede afirmar que el ensayo Fénix tiene una buena repetibilidad si se compara con otros ensayos como el SE (3-18%), DC (4-25%) y SCB (15-34%) [10].

A continuación se muestra una figura donde se refleja la influencia de la temperatura en las superficies de fractura de las probetas. A bajas temperaturas,  $-10^{\circ}\text{C}$ , la superficie fracturada muestra que la fisura se produce en toda la matriz árido - ligante dejando áridos fracturados a medida que la fisura progresa. A temperaturas intermedias,  $5^{\circ}\text{C}$ , se observa que la fractura del material se produce más en la interfase árido - ligante, fracturando sólo algunos de los áridos a medida que se propaga la fisura. Finalmente, a  $20^{\circ}\text{C}$ , la fractura se produce prácticamente sólo en la interfase árido - ligante [10].



**Figura 2. 22.** Superfícies de fisura per a la mescla S-20 a diferents temperatures de ensayo [10].

#### *2.5.5.4. Ventajas e inconvenientes*

Las ventajas que se pueden destacar del ensayo Fénix son las siguientes:

- Aplicable tanto a probetas estandarizadas (fabricadas por procedimientos Marshall o mediante compactador giratorio), como a testigos.
- Fácil montaje de las probetas y rápida ejecución del ensayo.
- Se ha demostrado que el ensayo Fénix es un procedimiento efectivo para caracterizar el comportamiento a fisuración de las mezclas asfálticas mediante sus propiedades de fractura y a su vez analizar la zona de softening (postpico).
- Existe un plano de rotura conocido y un estado tensional de tracción predominante.
- Puede ser aplicado en un amplio rango de temperaturas.
- Posee una buena sensibilidad frente a variables relativas a las mezclas bituminosas como son: composición de la mezcla temperatura de compactación, envejecimiento y temperatura de ensayo.

## 2.6. Conclusiones

---

Aunque durante muchos años se ha llevado a cabo el estudio de diversos ensayos con el fin de solucionar la problemática asociada a la fisuración de los pavimentos sometidos a bajas temperaturas, aún no se ha encontrado un ensayo que consiga buenos resultados dada su facilidad para la fabricación de probetas y su aplicación o dada su repetibilidad frente a diversas variables.

Como se ha comentado anteriormente, el ensayo SE (viga entallada) se ha utilizado en varios estudios para determinar las propiedades de fractura de las mezclas asfálticas. La geometría de este ensayo proporciona una adecuada propagación de la fisura de acuerdo con el modo I de fractura, sin embargo, su geometría tiene la desventaja de no ser una probeta estandarizada, por lo tanto, se limita su aplicabilidad a vigas compactadas en laboratorio, no permitiendo su aplicación a testigos. El ensayo SCB (viga semicircular a flexión) también ha sido aplicado a varios estudios dada su fácil aplicación a probetas y a testigos, y a que requiere un número menor de muestras por su geometría. Sin embargo, la forma de aplicación de la carga produce un complejo estado tensional que afecta en el proceso de propagación de la fisura, generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión en la zona cercana a la fisura. El ensayo DC tiene como ventaja el hecho que presenta un tamaño mayor del área de fractura y su aplicación a testigos, sin embargo, en el proceso de fabricación de las probetas se generan microfisuras en los alrededores de los orificios donde se aplica la carga. También cabe destacar el hecho que el ensayo no se puede efectuar a temperaturas superiores a los 10°C. Finalmente, en el ensayo DBDT, las muestras utilizadas se obtienen perforando los lados opuestos en rebanadas o discos, obtenidas a partir de muestras de laboratorio cilíndricas o de testigos de campo, sin embargo, la probeta está sometida a una carga de compresión y la tracción generada es de forma indirecta. Solo se calcula la resistencia que ofrece la probeta ensayada, despreciando por completo otros posibles parámetros determinantes para analizar los comportamientos generados en el proceso de fisuración.

Con el objetivo de encontrar un ensayo que mitigue los problemas comentados anteriormente, se ha desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Catalunya un nuevo ensayo experimental, llamado Fénix, cuya finalidad es evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de fisuración de las mezclas, formada por una combinación de energías liberadas durante el proceso de deformación y fractura del material.





## CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### 3.1. Introducción

---

En este apartado se presenta el procedimiento seguido en la fabricación de las probetas y su posterior ensayo realizado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Con la realización del estudio experimental se pretende analizar el comportamiento de cada una de las mezclas bituminosas elaboradas con diferentes tipos de betún y ensayadas a varias temperaturas con la finalidad de determinar su resistencia a la fisuración a bajas temperaturas.

### 3.2. Plan de trabajo

---

Para la elaboración de las probetas que se llevarán a cabo mediante el ensayo Fénix se fabricará una mezcla AC22 bin D y se utilizará un contenido de ligante de 5,26% sobre la masa de áridos (~ 63,1 g sobre 1.200 g). A su vez, se elaboraran cuatro tipos de mezclas diferentes, en función del contenido de betún:

- AC22 bin D con un betún convencional B 50/70 (1)
- AC22 bin D con un betún convencional B 50/70 (2)
- AC22 bin D con un betún modificado BM3c
- AC22 bin D con un betún de caucho BC 35/50

Para cada tipo de mezcla (4) se fabrican 9 probetas, es decir un total de 36 probetas, que serán ensayadas en función de la temperatura (a 20, 5 y -15°C). Cada probeta, una vez fabricada, se divide por la mitad, dejando claramente diferenciadas cada una de sus caras, obteniendo una cara A y otra cara B. En un primer momento sólo se ensayan las caras A, dejando las caras B para cualquiera error que pueda surgir durante el ensayo y se necesite repetirlo. Posteriormente se comentará como con las

caras B también se realizaron ensayos a  $-5^{\circ}\text{C}$  a velocidad de carga de  $v = 1 \text{ mm/min}$  y variando la velocidad de carga (ahora se considera una  $v = 0,1 \text{ mm/min}$ ) para ver el comportamiento y las propiedades de las mezclas.

Para la elaboración de las placas que se llevarán a cabo mediante el ensayo de fatiga a cuatro puntos se fabricará la misma mezcla con el mismo contenido de ligante y en función de los tipos de betún que se han comentado anteriormente.

Para cada tipo de mezcla (4) se fabrican 2 placas, teniendo un total de 8 placas que se ensayaran a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  con el objetivo de comparar los resultados obtenidos, para una misma mezcla, mediante los dos ensayos. Cabe destacar, que este ensayo sólo se realiza a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  ya que viene explicitado por Normativa Europea. A su vez, cada una de las placas se cortará en cinco probetas rectangulares de medidas  $40 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  (largo, ancho, alto). Finalmente, se ensayaran 10 probetas por mezcla (obteniendo un total de 40 probetas) con el fin de poder establecer una ley de fatiga.

Una vez finalizados todos los ensayos, se exponen los resultados obtenidos mediante cada uno de los ensayos y se establece una relación entre ellos. En este caso, la relación entre los dos ensayos únicamente se proporcionará para la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  ya que es a la única temperatura a la que el ensayo de fatiga se puede someter.

A continuación, se muestra una distribución de las probetas fabricadas en los dos ensayos utilizados:

Tipo de betún	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ensayos	
		Fénix	Fatiga a 4 puntos
<b>B 50/70 (1)</b>	20	3 (Caras A)	10
	5	3 (Caras A)	-
	-5	3 (Caras B)	-
	-5 (0,1) <sup>1</sup>	3 (Caras B)	-
	-15	3 (Caras A)	-
<b>B 50/70 (2)</b>	20	3 (Caras A)	10
	5	3 (Caras A)	-
	-5	3 (Caras B)	-
	-5 (0,1)	3 (Caras B)	-
	-15	3 (Caras A)	-
<b>BM3c</b>	20	3 (Caras A)	10
	5	3 (Caras A)	-
	-5	3 (Caras B)	-
	-5 (0,1)	3 (Caras B)	-
	-15	3 (Caras A)	-

<sup>1</sup> El valor indicado como -5 (0,1) se refiere a que a la temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$  se le aplica una velocidad de carga de  $0,1 \text{ mm/min}$ . Los demás valores de la temperatura que no tienen indicado un valor de velocidad entre paréntesis, se entiende que por defecto se le aplica una velocidad de carga de  $1 \text{ mm/min}$ .

<b>BC 35/50</b>	20	3 (Caras A)	10
	5	3 (Caras A)	-
	-5	3 (Caras B)	-
	-5 (0,1)	3 (Caras B)	-
	-15	3 (Caras A)	-

**Tabla 3. 1.** Distribución de las probetas utilizadas en los distintos ensayos.

### 3.3. Materiales empleados

A la hora de fabricar una mezcla bituminosa se debe tener en cuenta y prestar especial atención al material del que va a estar compuesta. Este tipo de mezclas se caracterizan por estar formadas por una fase sólida y otra líquida. La fase sólida está compuesta de áridos y filler, mientras que la fase líquida la compone una mezcla de líquidos orgánicos altamente viscosa formada principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos. A esta mezcla se la llama betún.

#### 3.3.1. Áridos

El tipo de árido utilizado en la fabricación de las mezclas bituminosas es de naturaleza caliza y proviene de la cantera FOJ situada en el municipio de Vallirana (Barcelona). La fracción llamada filler también es de naturaleza caliza y proviene del polvo de estos mismos áridos.

#### 3.3.2. Betún

En la presente tesina se han utilizado cuatro tipos diferentes de betún. En concreto dos convencionales, un modificado y por último, uno de caucho. Con la elección de la utilización de varios tipos de betún se pretende observar cómo actúan cuando están sometidos a las mismas características, con el fin de determinar cuál de ellos tiene mejores propiedades.

A continuación, se presenta una tabla donde se citan los tipos de betún utilizados en la fabricación de las mezclas bituminosas:

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>B 50/70</b>	<b>BM3c</b>	<b>BC 35/50</b>
<b>Penetración, 25°C</b>	0,1 mm	50 - 70	45 - 80	35-50
<b>Punto de reblandecimiento anillo y bola</b>	°C	46 - 54	≥ 65	≥ 58
<b>Punto de fragilidad de Fraass</b>	°C	≤ -8	≤ -12	≤ -5
<b>Recuperación Elástica a 25°C</b>	%	≥ 50	≥ 50	≥ 10
<b>Punto de Inflamación</b>	°C	≥ 230	≥ 235	≥ 235
<b>Durabilidad - Resistencia al envejecimiento</b>				
<b>Variación de masa</b>	%	≤ 0,5	≤ 1	≤ 1
<b>Penetración retenida</b>	%	≥ 50	≥ 60	≥ 65
<b>Aumento punto de Reblandecimiento</b>	°C	10	≤ 10	4 - 8

**Tabla 3. 2.** Características de los betunes.

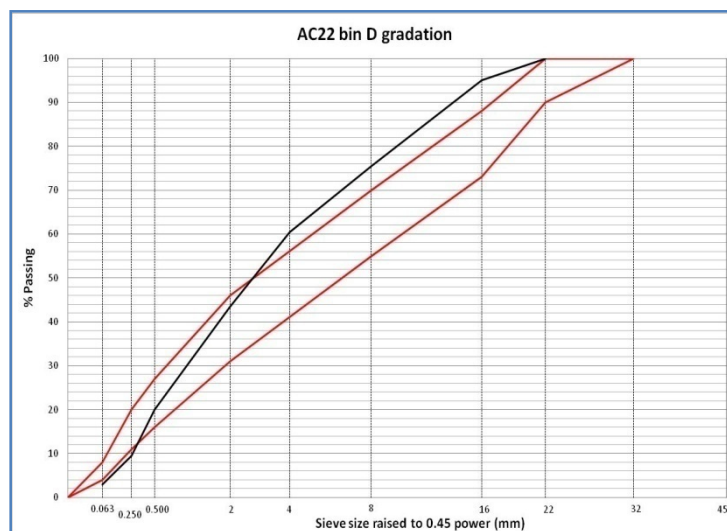
### 3.4. Granulometría

La mezcla bituminosa utilizada en el estudio experimental es del tipo AC22 bin D. Se trata de un hormigón asfáltico (AC) que tiene como tamaño máximo de árido la fracción del tamiz UNE 22 mm. El tipo de capa es intermedia y la mezcla es densa. A continuación se muestra el huso granulométrico correspondiente a la muestra:

<b>Tamiz UNE (mm)</b>	<b>Pasa (%)</b>	<b>Retenido (%)</b>	<b>Retenido (g) sobre 1.200g</b>
<b>22</b>	100	0	0
<b>16</b>	95	5	60
<b>8</b>	75,5	19,5	234
<b>4</b>	60,5	15	180
<b>2</b>	43,5	17	204
<b>0,5</b>	20	23,5	282
<b>0,25</b>	9,5	10,5	126
<b>0,063</b>	3	6,5	78
<b>Filler</b>	0	3	36

**Tabla 3. 3.** Huso granulométrico para mezclas AC22 bin D.

A continuación se muestra la curva granulométrica correspondiente a las distintas fórmulas de trabajo empleadas:



**Figura 3. 1.** Curva granulométrica de la mezcla empleada en el ensayo experimental.

La granulometría de los áridos, tanto para la fabricación de las probetas que se utilizarán para el ensayo Fénix como para las placas de fatiga, será la misma, ya que el tipo de mezcla es la misma. Lo que cambiará será el volumen a considerar en cada caso.

Para la fabricación de las probetas del ensayo Fénix se utilizará la siguiente granulometría:

<b>Tamiz UNE (mm)</b>	<b>Peso Retenido</b>	<b>Peso Acumulado</b>
<b>22</b>	0	-
<b>16</b>	60	60
<b>8</b>	163,8	223,8
<b>8</b>	70,2	294
<b>4</b>	126	420
<b>4</b>	54	474
<b>2</b>	204	678
<b>0,5</b>	282	960
<b>0,25</b>	126	1086
<b>0,063</b>	78	1164
<b>Filler</b>	36	1200

**Tabla 3. 4.** Granulometría de trabajo para la fabricación de las probetas del ensayo Fénix.

Siguiendo la granulometría de la mezcla, se han calculado los gramos necesarios de cada fracción de árido en la mezcla final de 1.200 g. En este caso, los gramos de betún a verter en la mezcla serán de 63,1 g.

Para la fabricación de las placas de fatiga se utilizará la siguiente granulometría:

<b>Tamiz UNE (mm)</b>	<b>Peso Retenido</b>	<b>Peso Acumulado</b>
<b>22</b>	0	-
<b>16</b>	675	675
<b>8</b>	1842,7	2517,7
<b>8</b>	789,8	3307,5
<b>4</b>	1417,5	4725
<b>4</b>	607,5	5332,5
<b>2</b>	2295	7627,5
<b>0,5</b>	3172,5	10800
<b>0,25</b>	1417,5	12217,5
<b>0,063</b>	877,5	13095
<b>Filler</b>	405	13500

**Tabla 3. 5.** Granulometría de trabajo para la fabricación de las placas del ensayo de fatiga.

Siguiendo la granulometría de la mezcla, se han calculado los gramos necesarios de cada fracción de árido en la mezcla final de 13.500 g. En este caso, se consideran 704,8 g de betún.

Hay que destacar el hecho de que para la fabricación de las probetas y de las placas, se han tenido en cuenta dos fracciones de los tamices UNE 8 y 4. Esto se debe al hecho de que en la cantera, para estos dos tamices, había dos tipos de fracciones diferentes. La primera fracción del tamiz 8 corresponde al grueso 12/16 y la segunda fracción al grueso 5/12. Para el tamiz 4, la primera fracción corresponde al grueso 5/12 y la segunda a la arena 0/9. Para calcular el peso retenido de las dos fracciones de los dos tamices (8 y 4), se ha considerado el 70% de la primera fracción y el 30% de la segunda.

### 3.5. Fabricación de las probetas

#### 3.5.1. Preparación de los áridos

Para la fabricación de las probetas, en primer lugar, se deben preparar los áridos que formaran las muestras. Para ello, previamente, deben pasar por un proceso de tamizado mediante los tamices UNE, quedando separados en las siguientes fracciones: 22, 16, 8 (grueso 12/16), 8 (grueso 5/12), 4 (grueso 5/12), 4 (arena 0/9), 2, 0,5, 0,25, 0,063.

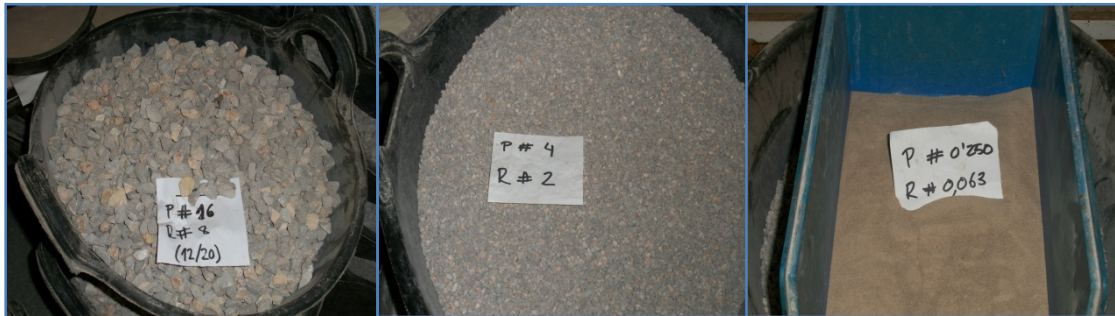


Figura 3. 2. Fracciones de árido del proyecto Madison.

Cabe destacar que el árido retenido en la fracción 0,063 se somete a un riguroso proceso de limpieza con agua mediante la ayuda de un tamiz que facilita la eliminación del filler que pueda contener.

Para la fabricación de cada probeta se coloca una bandeja sobre una balanza de precisión  $\pm 0,1$  g y se van pesando los áridos. Siguiendo la granulometría de cada formula de trabajo se calculan los gramos de cada fracción de árido en la mezcla final de 1.200 g. El sistema de medición se hace en peso acumulado de los áridos, del tamaño más grueso (22 mm) al más fino (0,063 mm). En total se preparan 36 bandejas metálicas correspondientes a las tres probetas que se deben fabricar por tipo de betún (4) y a ensayar a diferentes temperaturas (4).



Figura 3. 3. Pesado de los áridos para la fabricación de las probetas.



Para analizar las mismas mezclas pero con el ensayo de fatiga es necesario fabricar unas probetas más grandes, llamadas placas. El peso total de áridos para fabricar las placas será de 13.500 g. En este caso, el sistema de medición se hace en peso retenido debido al gran volumen de árido a pesar. Se coloca la bandeja en una balanza de mayor tamaño de precisión  $\pm 0,1$  g y se van pesando los áridos. Se trata de ir pesando los áridos individualmente e ir colocándolos en una bandeja aún mayor donde se mezclarán. Hay que tener en cuenta que el sistema de medición va del tamaño más grueso (22 mm) al tamaño más fino (0,063 mm). También hay que destacar el hecho de que cuando se ha acabado de pesar un tamiz, y antes de empezar a pesar el otro, hay que tarar la balanza para conseguir un correcto pesado.



**Figura 3. 4.** Balanza y bandejas utilizadas en el pesado de los áridos para las placas de fatiga.

Una vez pesados todos los áridos, se colocan en una estufa a la temperatura de entre  $160^{\circ}\text{C}$  –  $180^{\circ}\text{C}$ . Como mínimo deben estar en la estufa 4 horas antes del proceso de fabricación.

En lo que respecta a la fracción más fina, el filler, se pesa separadamente de los demás áridos, concretamente en un vaso de plástico, y en la misma balanza de precisión  $\pm 0,1$  g. Esto se debe a que con su pesado individual se consigue una mejor precisión y porque no se introduce en la mezcla hasta el final del mezclado. El filler no deberá permanecer en la estufa ya que al tratarse de una fracción tan fina se podría deteriorar o incluso calcinar.



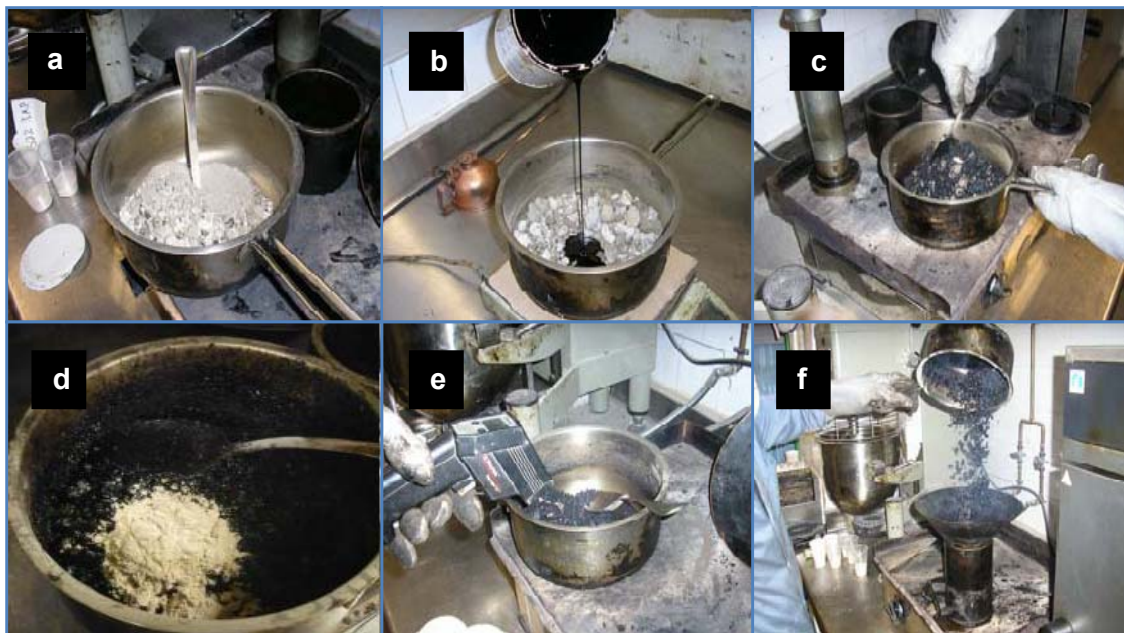
**Figura 3. 5.** Filler pesado en la balanza y colocado en vasos de plástico.

### 3.5.2. Fabricación de las mezclas

Previamente a la fabricación de las mezclas, se deben colocar los moldes cilíndricos donde posteriormente se colocará la mezcla, en una estufa a 160°C de temperatura al menos 12h antes de su fabricación, para que una vez se introduzca la mezcla, esta no pierda temperatura en contacto con el molde. El betún también debe colocarse en un estufa entre 1h – 1h 30min antes de llevar a cabo el proceso para que adquiera consistencia para la fabricación de la mezcla, pero no debe sobrepasar las 2h 30min ya que podría tener problemas de envejecimiento prematuro o pérdida de sus propiedades. En función del tipo de betún, se colocará a mayor o menor temperatura:

- Betún Convencional (B 50/70): a 155°C.
- Betún Modificado (BM3c): a 180°C.
- Betún Caucho (BC 35/50): a 170°C.

Los áridos se vierten en un recipiente metálico sobre una plancha que está a 160°C y se mezclan para que todos los tamaños queden bien repartidos. A continuación, se coloca el recipiente en una balanza de precisión  $\pm 0,1$  g, se tara y se añade la cantidad de betún necesaria correspondiente al contenido de ligante. Una vez añadido el contenido exacto de betún necesario para la mezcla, se coloca de nuevo el recipiente sobre la plancha y se mezcla todo el contenido (áridos y betún) hasta que el betún cubra bien todos los áridos. Por último, se añade el filler y se continúa con el proceso de mezclado hasta conseguir una mezcla homogénea.



**Figura 3. 6.** Proceso de fabricación de la mezcla: a) Áridos mezclados en un recipiente metálico sobre la plancha; b) Pesado del betún; c) Mezcla de los áridos con el betún; d) Se añade el filler; e) Comprobación de la temperatura; f) Colocación de la mezcla en el molde.

Cuando la mezcla ya esta lista, se introduce rápidamente en el molde de la probeta, con tal de que no pierda temperatura. Con la ayuda de un embudo la mezcla se coloca dentro del molde y con una espátula se le aplican 25 golpes (20 en la periferia y 5 en



la parte central) para homogeneizar la mezcla y evitar la presencia de huecos. Cabe destacar, que en la parte inferior del molde se coloca una base metálica y en cada una de sus bases se adhiere un papel. Los laterales se untan con parafina para que la mezcla no se quede pegada.

Finalmente, se coloca el molde con un collarín en la máquina de compactación por impacto (procedimiento Marshall). La compactación se produce a 75 golpes por cara, siguiendo las directrices de la Normativa Europea UNE 12697-34. Una vez ya está compactada, se extrae la probeta y con la ayuda de una espátula se quitan los papeles de las bases y se deja enfriar un día. Al día siguiente, se desmolda mediante un gato hidráulico que la separa del molde. Cabe destacar, que en todo momento, una vez enfriadas las probetas, y normalmente antes de desmoldarlas, las probetas deben ser numeradas para evitar posibles errores y seguir un control de fabricación.

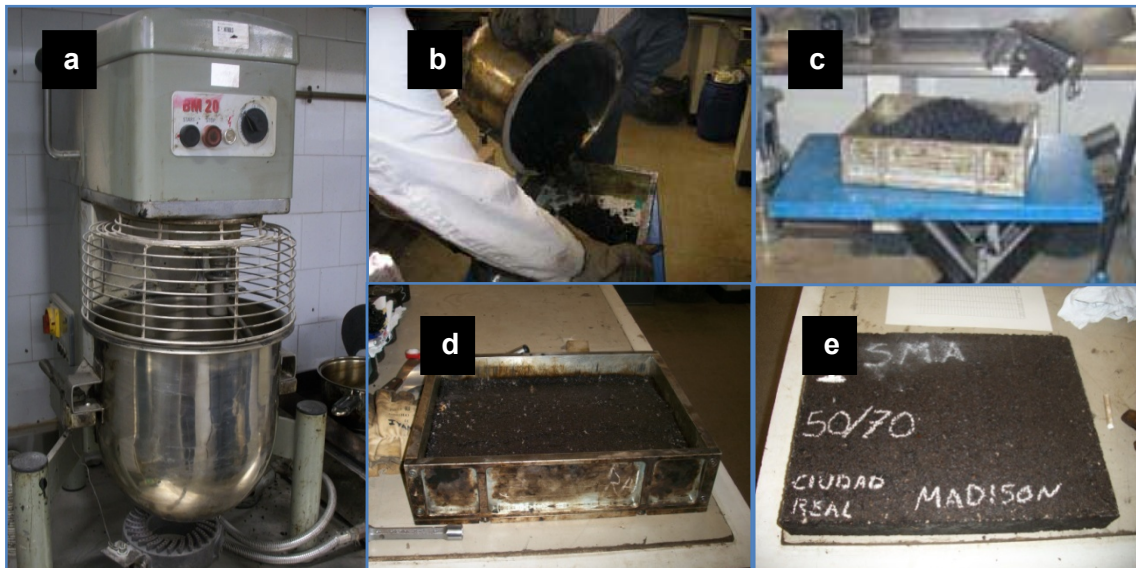


**Figura 3. 7.** a) Máquina compactadora (procedimiento Marshall); b) Número de golpes necesarios para la compactación; c) Probeta antes de desmoldar.

Una vez finalizado todo el proceso de fabricación, se deben limpiar correctamente los moldes con disolvente para evitar que queden enganchados posibles restos de la mezcla.

Para la fabricación de las placas de mezcla se realiza el mismo proceso. El único factor de diferencia es que al tratarse de grandes masas, el peso de los áridos debe realizarse en una balanza de mayor tamaño. También cabe destacar que los áridos se van pesando individualmente y se van colocando en una bandeja de grandes dimensiones, donde se mezclarán. Hay que recordar que cada vez que los áridos se pesan separadamente, hay que tarar la balanza para obtener un correcto pesado. Una vez tenemos la mezcla, el proceso de fabricación es el comentado anteriormente. La diferencia es que para el proceso de mezclado se requiere una amasadora debido al gran volumen de mezcla. Una vez se tiene la mezcla homogeneizada, se vierte en una

bandeja, donde previamente se ha cubierto bien la base con papeles para que cuando se desmolde no se queden adheridas partículas a la bandeja y se pierdan trozos de mezcla. El proceso de compactación se realiza con una compactadora de placas.



**Figura 3. 8.** Proceso de fabricación de las placas: a) Áridos mezclados en la amasadora; b, c) Vertido de la mezcla en la bandeja metálica; d) Mezcla compactada; e) Placa final.



**Figura 3. 9.** Máquina compactadora de las placas de fatiga.

Una vez ya esta compactada, se deja enfriar un día y posteriormente se desmolda. Para ello, hay que desmontar la placa metálica quitando los tornillos que hay en los bordes, y seguidamente se numera.

### 3.5.3. Normas consultadas

La fabricación de las probetas del laboratorio han seguido las directrices de la Norma Europea UNE-EN 12697-35 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio.”

## 3.6. Determinación de la densidad y el contenido de huecos

### 3.6.1. Densidad Aparente

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen incluido el porcentaje de huecos. Su valor se puede determinar mediante un procedimiento experimental o mediante uno teórico.

Para el método teórico se necesita medir el diámetro y el espesor de la probeta. Se trata de un proceso relativamente fácil, gracias a la regularidad de las probetas.

Para obtener la altura media de cada probeta, se realizan 3 mediciones en posiciones uniformemente espaciadas según un ángulo de 60°. Estas mediciones se realizan con un pie de rey de precisión también  $\pm 0,1$  g.



**Figura 3. 10.** Medición de la altura de la probeta con un pie de rey.

El diámetro de las probetas está definido por el molde de fabricación de las mismas y es de 101,6 mm (diámetro convencional de una probeta Marshall).

Una vez se obtienen todas las medidas, la densidad aparente se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{h_m \cdot \pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} \quad (3.1)$$

Donde:

$\rho_{ap}$  Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )

$h_m$  Altura media de la probeta (cm)

$\phi$  Diámetro de la probeta (cm)

Para la determinación de la densidad mediante el método experimental se llevará a cabo el procedimiento para probetas de superficie cerrada. Para calcular la densidad necesitamos conocer la masa y el volumen de la probeta. La masa ( $m_1$ ) se obtiene pesando en seco la probeta en una balanza de precisión  $\pm 0,1$  g. A continuación se sumerge la probeta en agua, quedando apoyada en una cesta de alambre que está conectada a la balanza y se calcula su peso sumergido. En general, el tiempo necesario para que la probeta se estabilice y se sature, obteniendo un valor correcto de peso sumergido ( $m_2$ ) suele ser de 30 minutos. Una vez pasados los 30 minutos se saca la probeta del agua, se secan ligeramente las gotas adheridas a la superficie y se vuelve a pesar obteniendo la masa de la probeta saturada en superficie seca ( $m_3$ ).



**Figura 3. 11.** Procedimiento experimental para la determinación de las densidades aparentes.

Con estos tres parámetros se determina la densidad aparente de la probeta mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{ap} = \rho_W \cdot \frac{m_1}{(m_3 - m_2)} \quad (3.2)$$

Donde:

$m_1$  Masa de la probeta seca (g)

$m_2$  Masa de la probeta sumergida en agua (g)

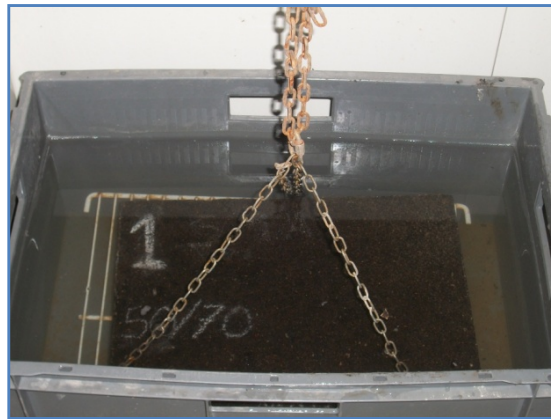
$m_3$  Masa de la probeta con superficie saturada seca (g)



$\rho_w$  Densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

Una vez ya se ha calculado la densidad de todas las probetas se dejan secar para poder ensayarlas, ya que no pierden propiedades en la utilización de este ensayo.

Para el caso de las placas de fatiga se ha seguido el mismo procedimiento experimental para obtener la densidad aparente. La única diferencia respecto a las probetas es la forma en que se miden las alturas de la placa. En este caso se toman tres medidas respecto al largo de la placa y otras tres, respecto al ancho. Estas mediciones también se realizan con un pie de rey de precisión  $\pm 0,1 \text{ g}$ .



**Figura 3. 12.** Placa de fatiga sumergida en agua, para calcular la densidad aparente.

Posteriormente, cuando ya se ha calculado la densidad aparente de cada placa, cada una de ellas se corta, obteniendo 5 probetas por placa. Para cada probeta, también se miden las alturas y se calcula su densidad aparente.

En la presente tesina, para el cálculo de la densidad aparente se utilizó el método experimental. Los resultados referentes al ensayo se pueden consultar en el *Anejo 2: Ensayo Fénix. Densidades y contenido de huecos* y en el *Anejo 5: Ensayo de fatiga en cuatro puntos. Densidades y contenido de huecos* donde se muestran las densidades aparentes de cada probeta.

### 3.6.2. Contenido de Huecos

Para calcular el contenido de huecos de aire en una probeta bituminosa se sigue la Normativa Europea NLT-168/90.

El contenido de huecos de aire de una mezcla es el volumen ocupado por los huecos de aire en una probeta bituminosa, expresado en porcentaje del volumen total de la probeta.

Para calcular el contenido de huecos de aire de una mezcla es necesario conocer la densidad aparente y la densidad máxima de la mezcla.

La densidad aparente, como se ha comentado anteriormente, es la masa por unidad de volumen, incluidos los huecos de aire, de una probeta bituminosa a una temperatura de ensayo conocida.

La densidad máxima se define como la masa por unidad de volumen, sin incluir los huecos de aire, de un material bituminoso a una temperatura conocida.

Por lo tanto, el porcentaje de huecos de una mezcla se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$V_m = \left( \frac{\rho_m - \rho_{ap}}{\rho_m} \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

Donde:

$V_m$       Contenido de huecos de aire en la mezcla (%)

$\rho_m$       Densidad teórica máxima de la mezcla ( $\text{Kg/m}^3$ )

$\rho_{ap}$       Densidad aparente de la probeta ( $\text{Kg/m}^3$ )

La densidad aparente de la probeta se ha calculado siguiendo el procedimiento experimental comentado en el apartado anterior.

Para calcular la densidad teórica máxima de la mezcla se ha seguido la Normativa Europea UNE-EN 12697-5 y se ha utilizado la siguiente expresión:

$$\rho_m = \frac{100}{\left( \frac{\%a}{\rho_a} \right) + \left( \frac{\%b}{\rho_b} \right)} \quad (3.4)$$

Donde:

$\rho_m$       Densidad teórica de las mezclas

$\%a$       Porcentaje en masa de los áridos

$\rho_a$ :      Densidad de los áridos

$\%b$ :      Porcentaje en masa del betún

$\rho_b$       Densidad del betún

Los resultados referentes al ensayo se pueden consultar en el *Anejo 2: Ensayo Fénix. Densidades y contenido de huecos* y en el *Anejo 5: Ensayo de fatiga en cuatro puntos. Densidades y contenido de huecos* donde se muestra el contenido de huecos de cada probeta.

### 3.6.3. Normas Consultadas

Para una correcta determinación de las distintas propiedades mecánicas de las mezclas se han tenido en cuenta las siguientes partes de la Normativa Europea:

UNE-EN 12697-29. Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 29: Determinación de las dimensiones de las probetas.

UNE-EN 12697-6. Mezclas Bituminosas: Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático.

UNE-EN 12697-5. Mezclas Bituminosas: Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima.

UNE-EN 12697-8. Mezclas Bituminosas: Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas.

## 3.7. Ensayos Utilizados

### 3.7.1. Ensayo Fénix

#### 3.7.1.1. Introducción y ámbito de aplicación

La fisuración de los pavimentos es una de las causas más frecuentes de deterioro. Las continuas sollicitaciones producidas por el medio ambiente y el tráfico que se manifiestan mediante variaciones térmicas y diferentes tipologías y velocidades de aplicación de las cargas producen la deformación del pavimento en la zona de rodadura.

El ensayo Fénix es un ensayo de tracción desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la UPC para evaluar los mecanismos de fisuración en las mezclas asfálticas. Se trata de un ensayo sencillo y fácil de ejecutar que permite determinar la resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas mediante el cálculo de la energía disipada en el proceso de fisuración. Otra ventaja asociada a este ensayo es que permite utilizar tanto probetas Marshall como testigos extraídos.

Por otra parte, también cabe destacar el hecho de que permite el estudio de la tenacidad de la mezcla, ya que si la mezcla presenta tenacidad, su rotura se produce con una gran deformación y absorbiendo energía una vez se inicia el proceso de rotura.

En conclusión, con el ensayo Fénix se puede simular el mecanismo de fisuración de las mezclas bituminosas cuando estas están sometidas al medioambiente (esfuerzos térmicos) y a las sollicitaciones del tráfico.

### 3.7.1.2. Descripción del ensayo

El ensayo consiste en aplicar a media probeta cilíndrica con una fisura inducida de 6 mm de longitud fabricada mediante el procedimiento Marshall a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento conocida (1 mm/min) y a una temperatura determinada.

Mediante este ensayo se puede graficar la curva Carga - Desplazamiento que se muestra en la figura:

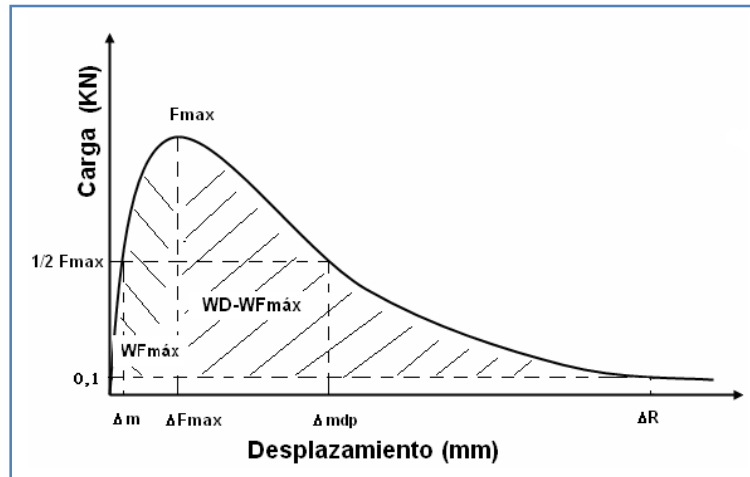


Figura 3. 13. Curva Carga - Desplazamiento resultante del ensayo Fénix.

Durante la ejecución del ensayo las cargas generadas se van registrando mediante un equipo de adquisición de datos, en función del desplazamiento con el fin de calcular los parámetros mecánicos vinculados al proceso de fisuración que se muestran a continuación:

La **carga máxima a tracción** ( $F_{máx}$ ) registrada en el ensayo de tracción directa.

El **desplazamiento a carga máxima** ( $\Delta_{Fmáx}$ ) es el realizado por el pistón cuando se registra la carga máxima a tracción.

La **resistencia a tracción** ( $R_T$ ) es la relación entre la carga máxima,  $F_{máx}$ , y el área de fractura.

$$R_T = \frac{1000 \cdot F_{máx}}{h \cdot l} \quad (3.5)$$

Donde:

$R_T$  Resistencia a tracción (MPa)

$F_{máx}$  Carga máxima a tracción (KN)

$h$  Espesor de la probeta (m)



$l$  Longitud inicial de ligamento (m)

La **energía de fractura (o disipada) en todo el proceso de fisuración del material ( $G_F$ )** es el trabajo disipado en el proceso de fisuración ( $W_D$ ) dividido entre el área de fractura perpendicular a la fuerza aplicada.

$$G_F = \frac{W_D}{h \cdot l} \quad (3.6)$$

Donde:

$G_F$  Energía de fractura (o disipada) por unidad de superficie en el proceso de fisuración ( $J/m^2$ )

$W_D$  Trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga - Desplazamiento) ( $KN \cdot mm$ )

$h$  Espesor de la probeta (m)

$l$  Longitud inicial de ligamento (m)

El **desplazamiento a rotura ( $\Delta_R$ )** es aquel por el cual la carga cae hasta los 0,1 KN. Con este parámetro calculamos la energía disipada en el proceso de fractura y nos permite distinguir a igual valor de energía de fractura ( $G_F$ ), las mezclas más frágiles de las dúctiles.

El **desplazamiento al 50%  $F_{m\acute{a}x}$  postpico ( $\Delta_{mdp}$ )** es el registrado por la mezcla una vez que el valor de la carga ha disminuido a la mitad del valor de su carga máxima. Con este parámetro podemos medir la capacidad que tiene la mezcla a admitir una cierta deformación, por lo tanto, con mezclas frágiles se obtendrán valores de  $\Delta_{mdp}$  menores, i al revés, con mezclas dúctiles obtendremos valores mayores de  $\Delta_{mdp}$ .

El **índice de tenacidad ( $I_T$ )** es la energía disipada en el período de relajación multiplicada por un factor de fragilidad. Este factor representa el desplazamiento realizado desde la carga máxima,  $F_{m\acute{a}x}$ , hasta que la carga ha caído a la mitad de su valor máximo. Con este parámetro se evalúa la tenacidad de la mezcla bituminosa. Conforme  $I_T$  aumenta la mezcla se vuelve más tenaz o más dúctil, mientras que cuando va disminuyendo, la mezcla asume un comportamiento más frágil.

$$I_T = \frac{W_D - W_{Fm\acute{a}x}}{h \cdot l} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{Fm\acute{a}x}) \quad (3.7)$$

Donde:

$I_T$  Índice de tenacidad (J/mm)

$W_D$  Trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga - Desplazamiento) (KN · mm)

$W_{Fmáx}$  Trabajo disipado hasta carga máxima (KN · mm)

$h$  Espesor de la probeta (m)

$l$  Longitud inicial de ligamento (m)

$\Delta_{mdp}$  Desplazamiento a  $\frac{1}{2} F_{máx}$  postpico (mm)

$\Delta_{Fmáx}$  Desplazamiento a  $F_{máx}$  (mm)

El **índice de rigidez a tracción ( $I_{RT}$ )** es la relación entre el valor medio de la carga máxima,  $\frac{1}{2} F_{máx}$  y el desplazamiento correspondiente a ese valor de carga antes de la carga máxima,  $\Delta_m$ . A mayor valor de  $I_{RT}$  menor flexibilidad tiene la mezcla.

$$I_{RT} = \frac{\frac{1}{2} F_{máx}}{\Delta_m} \quad (3.8)$$

Donde:

$I_{RT}$  Índice de rigidez a tracción (KN/mm)

$F_{máx}$  Carga máxima a tracción (KN)

$\Delta_m$  Desplazamiento antes de la carga máxima a  $\frac{1}{2} F_{máx}$  (mm)

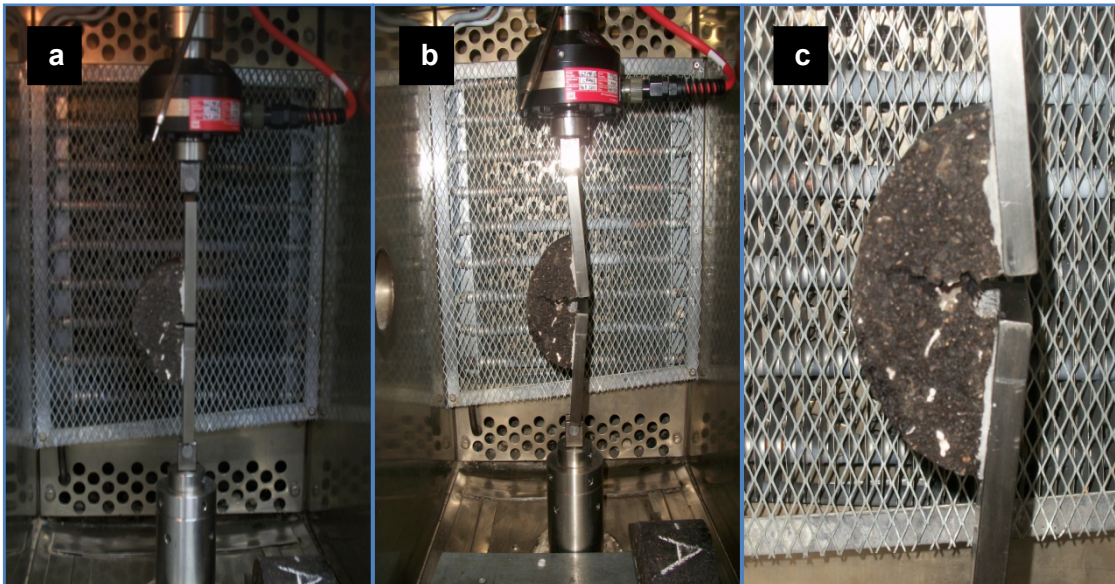
### 3.7.1.3. Procedimiento experimental

Las probetas empleadas en el ensayo se fabrican mediante el ensayo Marshall, compactándose por impacto mediante 75 golpes por cara. Seguidamente se divide la probeta en dos, separando la probeta por su parte central en dos partes que se caracterizan porque tienen forma cilíndrica con una fisura inducida de 6 mm de longitud. Posteriormente, se fijan mediante una resina epoxi unas placas de acero a las dos secciones de cara plana de la probeta separadas por la entalladura.



**Figura 3. 14.** Probetas utilizadas en el ensayo Fénix.

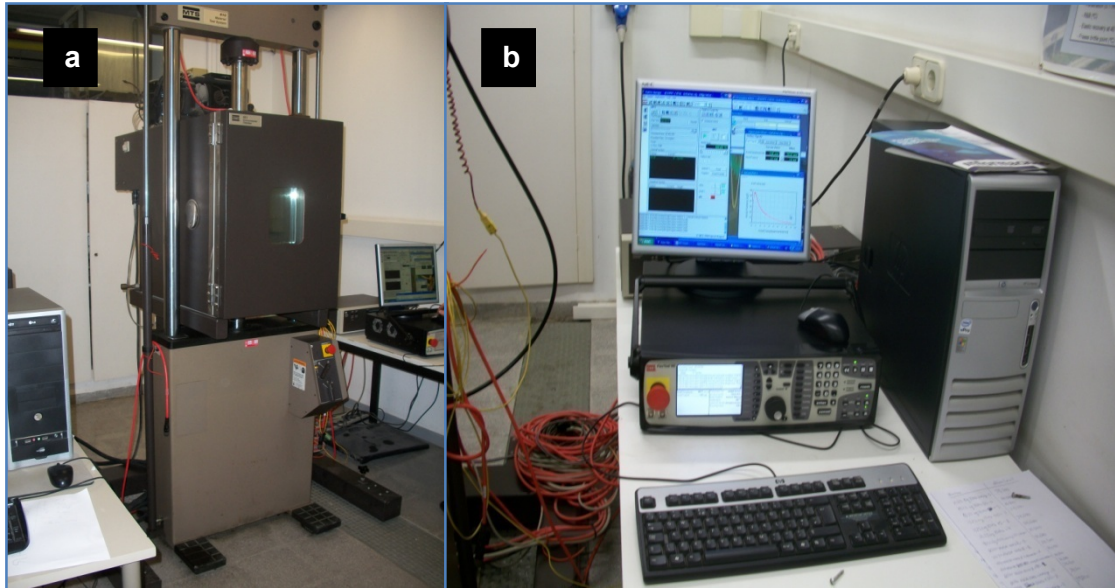
Las placas de acero se fijan a los soportes de la prensa en posición vertical permitiendo un movimiento de rotación respecto a las fijaciones. Una vez colocada la probeta a la prensa, se le somete a un esfuerzo de tracción a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min y a diferentes temperaturas de ensayo (20, 5, -5 y -15°C). Posteriormente, también se ensayaron diferentes probetas a velocidad de 0,1 mm/min a la temperatura de -5°C.



**Figura 3. 15.** a) Probeta antes de ser sometida al ensayo; b) Probeta después del ensayo; c) Fallo de la probeta.

Durante la ejecución del ensayo, mediante un equipo de adquisición de datos, se van registrando las cargas generadas en función del desplazamiento de las placas de acero. Con estos valores, juntamente con las medidas de la probeta, se puede calcular

la energía disipada en el proceso de fisuración y los parámetros mecánicos comentados anteriormente que sirven para caracterizar la mezcla.



**Figura 3. 16.** a) Máquina utilizada en el ensayo Fénix; b) Equipo de adquisición de datos.

En el *Anejo 3: Ensayo Fénix. Curvas Tensión - Desplazamiento de las probetas ensayadas en función de la temperatura de ensayo y la velocidad de aplicación de carga* se pueden consultar los gráficos obtenidos de la realización del ensayo para cada probeta.

#### 3.7.1.4. Normas consultadas

Se trata de un nuevo ensayo experimental, por lo que no existe una normativa específica a seguir. Únicamente, se han seguido las indicaciones del estudio experimental que se realizó en su momento para el desarrollo del ensayo. Dicho estudio se encuentra en la publicación IV Jornada Nacional, ADEFMA 2009.

### 3.7.2. Ensayo de fatiga en cuatro puntos

#### 3.7.2.1. Introducción y ámbito de aplicación

La fatiga se define como la pérdida de resistencia de un material cuando está sometido a la aplicación repetida de cargas. La resistencia a la fatiga es una de las propiedades más limitantes en cuanto se refiere a la construcción de firmes, ya que se trata de un parámetro que está muy ligado a la vida del pavimento.

Este ensayo trata de caracterizar el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a cargas de fatiga en un equipo de flexión en cuatro puntos, utilizándose probetas rectangulares esbeltas. Para ello, la probeta prismática se debe someter periódicamente a flexión sobre cuatro puntos. La flexión se debe realizar por la aplicación de la carga en dos puntos interiores en sentido vertical y



perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta, fijando la posición vertical de los soportes de extremo. Con esta configuración de carga se crea una deformación constante.

Cabe destacar que debido a la naturaleza heterogénea de los materiales compuestos se necesita un mayor número de muestras a ensayar para cada tipo de betón con el objetivo de obtener unos resultados representativos para cada tipo de mezcla.

### 3.7.2.2. Descripción y procedimiento del ensayo

El ensayo de fatiga utilizado en la presente tesina ha sido el *ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas*. Para cada tipo de betón (4) se han fabricado 2 placas. Cada una de estas placas se ha dividido en cinco probetas rectangulares y prismáticas, listas para ser ensayadas de una en una en la máquina de fatiga.



**Figura 3. 17.** Placa y probeta de fatiga.

Posteriormente, se introducen las probetas en la máquina de fatiga y se impone una frecuencia de 10 Hz. A las probetas se las somete a una deformación inicial repetida hasta que se produce el fallo. Dentro de un mismo tipo de betón, como tenemos 10 probetas a ensayar, a cada una de ellas se le va variando la deformación para analizar cómo se comporta el material y poder interpolar la ley de fatiga del material.



**Figura 3. 18.** Máquina de flexión en cuatro puntos.

Los resultados obtenidos una vez ensayadas las probetas son:

- Módulo de rigidez inicial
- Deformación inicial (impuesta)
- N° de ciclos hasta el fallo

A partir de estos datos, se ha realizado una gráfica “módulo de rigidez inicial – n° de ciclos hasta el fallo” y se ha calculado la ley de fatiga de las mezclas mediante un gráfico “n° de ciclos hasta el fallo – deformación inicial”. Este último gráfico mediante el cual obtenemos la ley de fatiga se traza como una aproximación lineal de los resultados puntuales obtenidos.

En este caso, la temperatura del ensayo ha sido de 20°C según establece la Normativa.

#### *3.7.2.3. Normas consultadas*

Para realizar el ensayo de fatiga en cuatro puntos se ha consultado la Normativa Europea UNE-EN 12697-24 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga.”

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Introducción

---

Una vez se ha realizado el estudio experimental, se presentan los resultados obtenidos con cada uno de los ensayos y se analizan. Para cada mezcla se ha mantenido constante la tipología de los áridos y del filler y el porcentaje de contenido de ligante, pero se ha ido variando el tipo de betún. En el caso del ensayo Fénix, también se ha ido variando la temperatura de realización del ensayo y la velocidad de aplicación de carga. Por lo tanto, para cada mezcla, se estudiará su resistencia a la fisuración en función del ligante utilizado y de la temperatura a la que están sometidas.

Existen cuatro tipo de mezclas en función del contenido de ligante (B 50/70 (1), B 50/70 (2), BM3c y BC 35/50) y cada mezcla se analizará a tres temperaturas diferentes (20, 5 y -15°C). Posteriormente, se comenta como el ensayo también se realiza a la temperatura de -5°C y a diferente velocidad de carga.

Con el ensayo Fénix se evalúa el efecto de la temperatura y el tipo de betún en el comportamiento a fractura de las mezclas bituminosas. Los resultados obtenidos no son definitivos, pero si se pueden considerar como una orientación a la situación real de resistencia a fisuración de los pavimentos sometidos a bajas temperaturas.

### 4.2. Ensayo Fénix

---

#### 4.2.1. *Densidad Aparente y Contenido de Huecos*

Se han ensayado un total de 60 probetas para el ensayo Fénix, teniendo en cuenta que se han utilizado para ensayar, 36 caras A y 24 caras B. A continuación, se presenta una tabla donde se muestran las densidades, el contenido de huecos, la desviación típica y el coeficiente de variación promedios para cada serie (en función del tipo de betún) de cada una de las mezclas. Es decir, el valor promedio de cada serie formada por 9 probetas.

<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Densidad Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Contenido de Huecos (%)</b>	<b>Desviación Típica</b>	<b>Coefficiente de Variación (%)</b>
<b>B 50/70 (1)</b>	2,380	4,6	0,00672	0,28
<b>B 50/70 (2)</b>	2,377	4,7	0,00511	0,22
<b>BM3C</b>	2,389	4,3	0,00348	0,15
<b>BC 35/50</b>	2,376	4,8	0,00330	0,14

**Tabla 4. 1.** Densidad aparente, contenido de huecos, desviación típica y coeficiente de variación (valores promedio ensayo Fénix).

La desviación estándar informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética (promedio).

El coeficiente de variación es una medida de dispersión que sirve para comparar variables que están relacionadas estadísticamente pero que están a distintas escalas.

Como se puede observar en la tabla 4.1, todos los valores obtenidos correspondientes a la desviación típica y al coeficiente de variación son bajos, concretamente, para el  $C_v$  a menor valor, mayor homogeneidad en los valores de la variable (densidad aparente). Por lo tanto, los valores de cada probeta y el valor promedio de todas las probetas son muy similares, tal y como demuestran la desviación típica y el coeficiente de variación.

En el *Anejo 2: Ensayo Fénix. Densidades y Contenido de Huecos* se encuentra la densidad aparente, el contenido de huecos, la desviación estándar y el coeficiente de variación correspondiente a cada probeta.

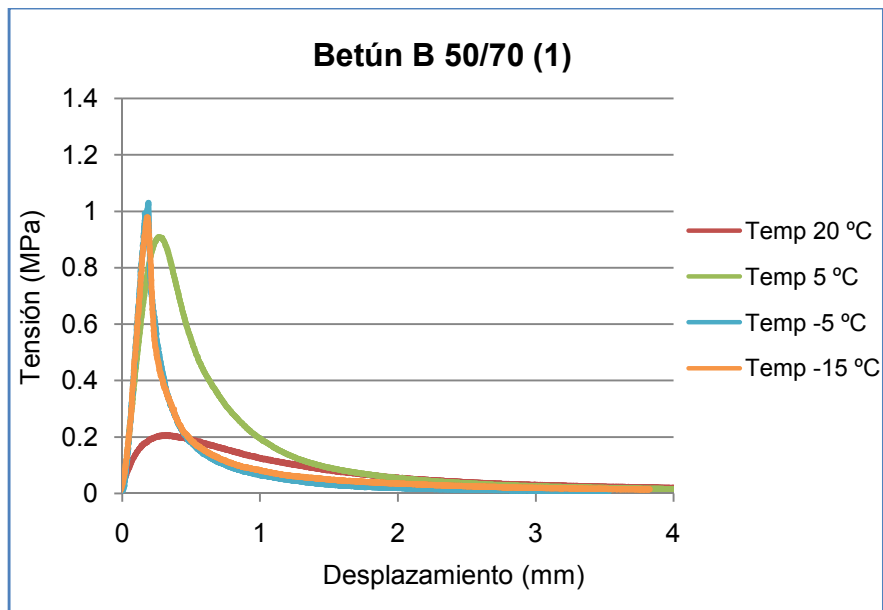
#### 4.2.2. Curvas Tensión - Desplazamiento

Una vez procesados los resultados obtenidos mediante el ensayo Fénix se obtienen las curvas Tensión - Desplazamiento para cada una de las probetas ensayadas. A partir de estas gráficas se pueden obtener también distintos parámetros que caracterizan las mezclas bituminosas frente a la fisuración.

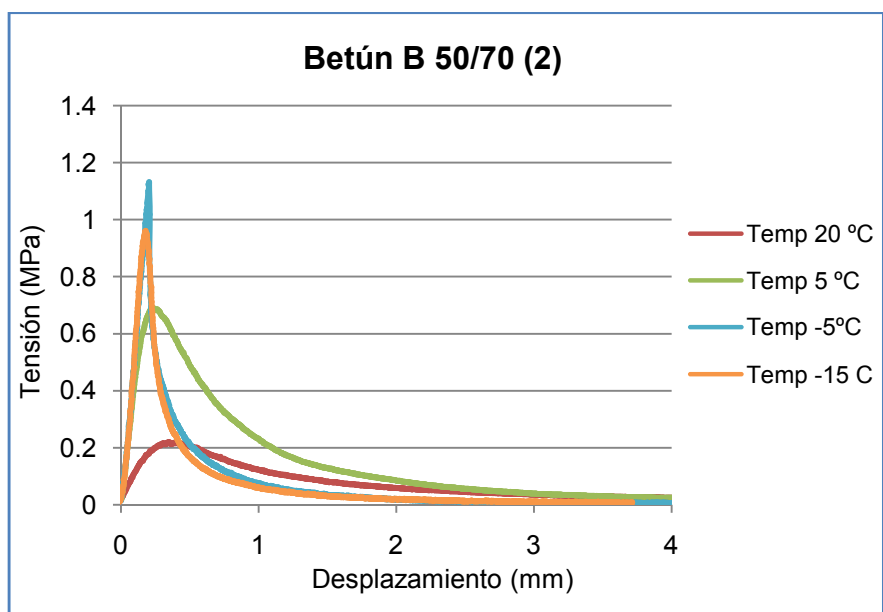
Las curvas Tensión - Desplazamiento para cada probeta ensayada en función de la temperatura de ensayo y de la velocidad de aplicación de carga se pueden consultar en el *Anejo 3: Ensayo Fénix. Curvas Tensión - Desplazamiento de las probetas ensayadas en función de la temperatura de ensayo y la velocidad de aplicación de carga*.

A continuación, se muestran las curvas Tensión - Desplazamiento de los distintos ligantes cuando están sometidos a diferentes temperaturas.





**Figura 4. 1.** Curva Tensión - Desplazamiento para el betún B 50/70 (1).



**Figura 4. 2.** Curva Tensión - Desplazamiento para el betún B 50/70 (2).

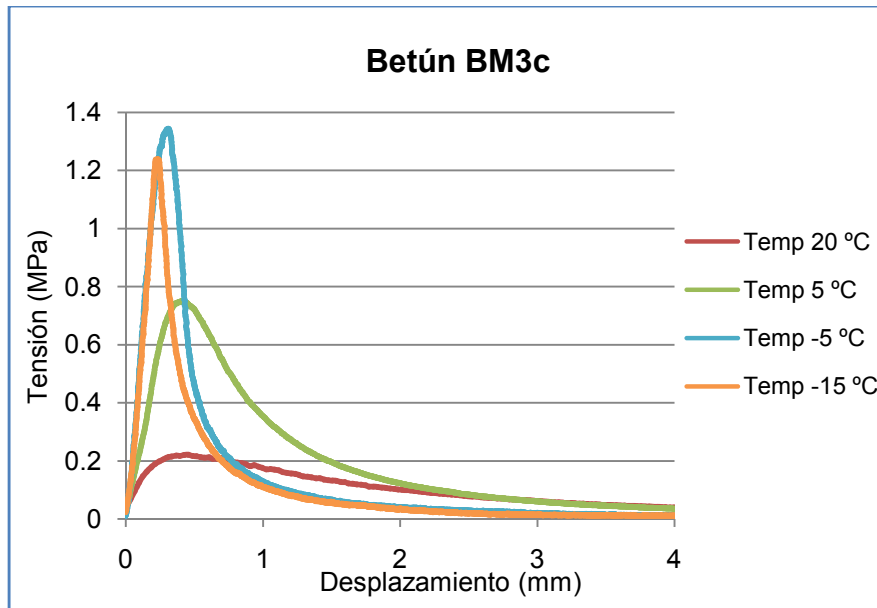


Figura 4. 3. Curva Tensión - Desplazamiento para el betún BM3c.

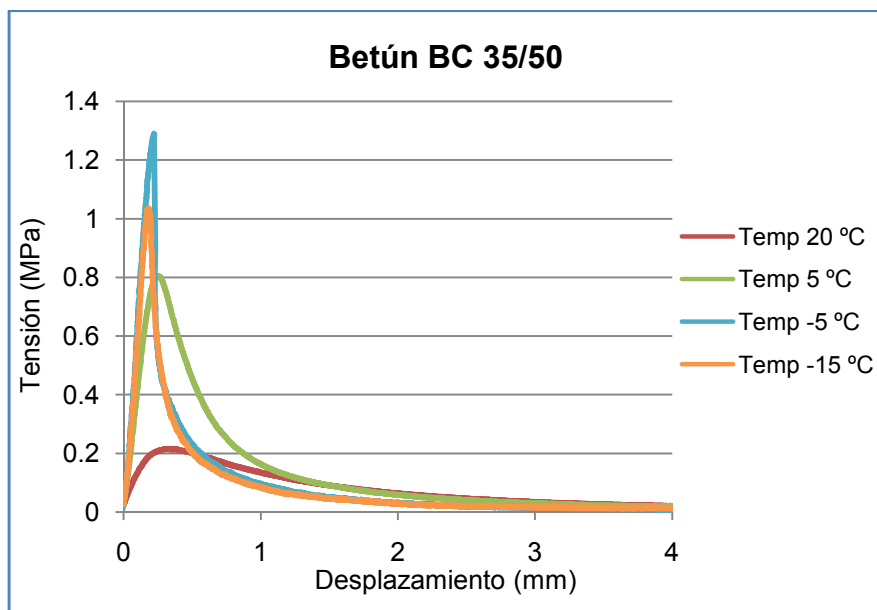


Figura 4. 4. Curva Tensión - Desplazamiento para el betún BC 35/50.

Como se muestra en las graficas anteriores, el comportamiento de las cuatro mezclas a la temperatura de 20°C es muy similar, sobretodo, entre las formadas por los dos betunes convencionales, donde las diferencias entre ellos no se aprecian. Este hecho se debe a que a altas temperaturas, las mezclas tienen un comportamiento muy parecido y a efectos de propiedades y características no reflejan diferencias entre ellas.

A medida que la temperatura disminuye, las diferencias entre las mezclas se hacen evidentes. A la temperatura de 5°C se puede observar como la mezcla formada con

betún modificado (figura 4.3) presenta un comportamiento más dúctil que las demás mezclas ya que en la zona de softening no decae tan rápidamente sino que se deforma durante un tiempo antes de llegar a rotura, influenciada por un valor mayor del desplazamiento a rotura ( $\Delta R$ ) incrementándose así la energía de fractura ( $G_F$ ). Las mezclas formadas por los dos betunes convencionales y el betún de caucho muestran un comportamiento similar entre ellas en la zona de softening de la curva Tensión - Desplazamiento, pero el B 50/70 (1) es capaz de resistir mas carga antes de llegar a la deformación.

A la temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$ , se aprecia claramente como, de nuevo, la mezcla de betún modificado continua presentando un mejor comportamiento frente a la fisuración, ya que es capaz de resistir mas carga y tiene una mayor energía de fractura, reflejando un comportamiento más dúctil del material. En este caso, la mezcla de betún de caucho presenta unas condiciones similares a las de los betunes convencionales ya que en la zona de softening se comportan como un material frágil. La única diferencia significativa es que el caucho es capaz de resistir mas carga antes de llegar al punto de rotura que los dos betunes convencionales.

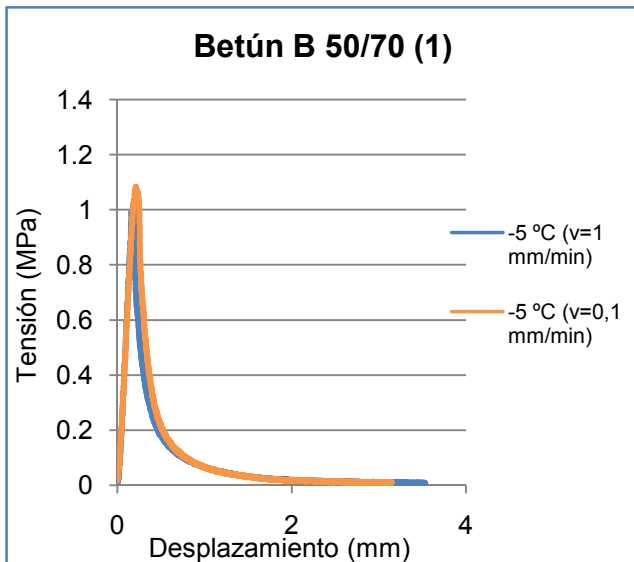
Finalmente, para la temperatura de  $-15^{\circ}\text{C}$ , la mezcla con betún modificado vuelve a tener mejores propiedades frente a la fisuración que los demás, aunque en este caso no se ven diferencias tan claras, ya que en la zona de softening decaen prácticamente de igual forma. Las mezclas de betún de caucho y las convencionales tienen un comportamiento similar en cuanto a carga máxima soportada y a desplazamiento a rotura, presentando un carácter un poco más frágil que el modificado.

#### **4.2.3. Curvas Tensión - Desplazamiento a $-5^{\circ}\text{C}$ con diferentes velocidades de aplicación de carga**

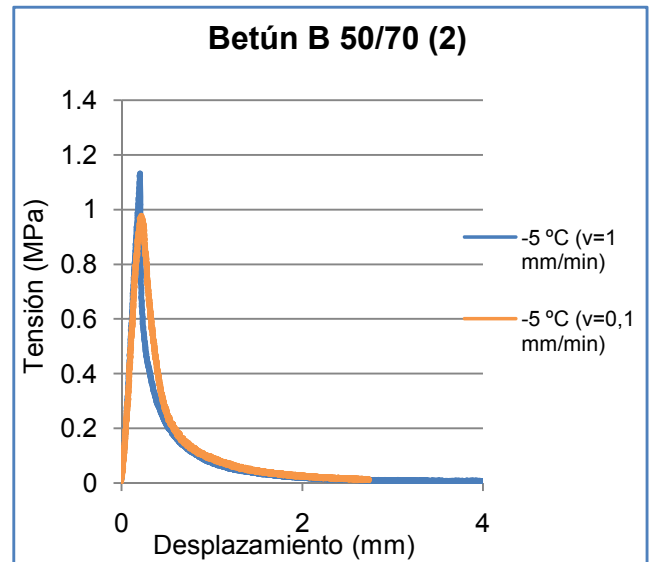
Una vez realizados todos los ensayos correspondientes a  $20$ ,  $5$  y  $-15^{\circ}\text{C}$ , se optó por repetirlos, utilizando las correspondientes caras B de las probetas, pero a diferentes temperaturas de ensayo y velocidades de aplicación de carga, con el fin de ver la variación de las propiedades de las mezclas ya ensayadas.

Los ensayos se repitieron a  $-5^{\circ}\text{C}$  y con una velocidad de aplicación de carga de  $1\text{ mm/min}$  (tal y como se habían realizado las otras temperaturas) y a  $-5^{\circ}\text{C}$  variando la velocidad, concretamente, utilizando una velocidad de  $0,1\text{ mm/min}$ .

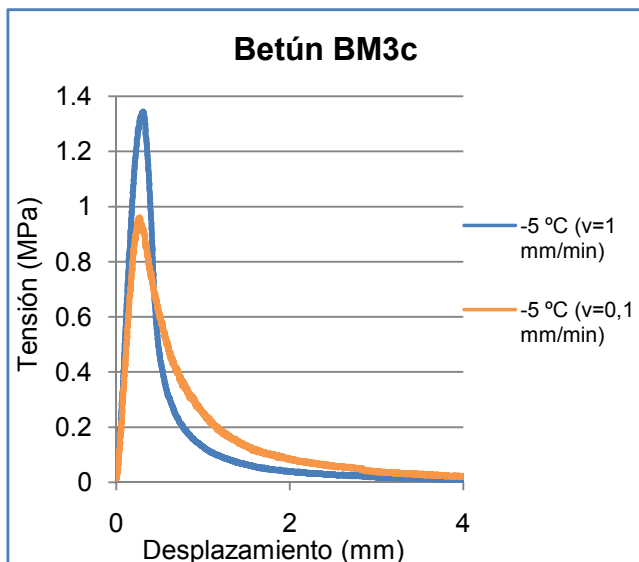
A continuación, se presentan las curvas Tensión - Desplazamiento de los distintos betunes cuando están sometidos a la temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$  y a diferentes velocidades de aplicación de carga.



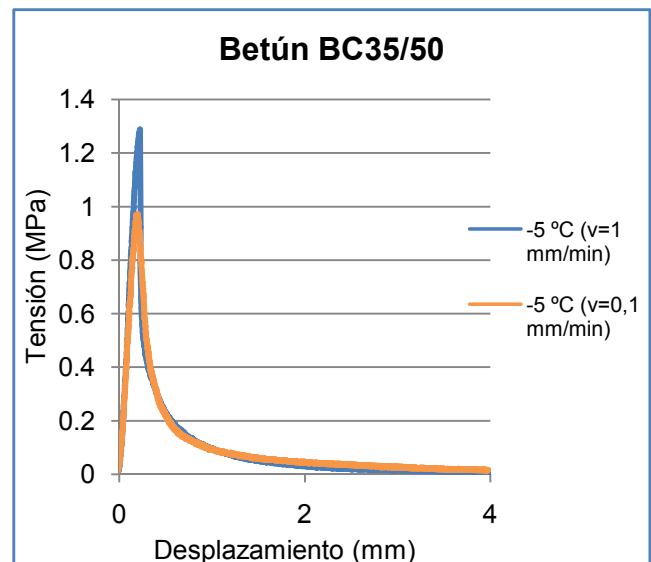
**Figura 4. 5.** Curva Tensión - Desplazamiento para el betún B 50/70 (1) (-5°C).



**Figura 4. 6.** Curva Tensión - Desplazamiento para el betún B 50/70 (2) (-5°C).



**Figura 4. 7.** Curva Tensión - Desplazamiento para el betún BM3c (-5°C).



**Figura 4. 8.** Curva Tensión - Desplazamiento para el betún BC 35/50 (-5°C).

Al bajar la velocidad de aplicación de carga, la respuesta es menos rígida y más dúctil, y por lo tanto, es equivalente a aumentar la temperatura de ensayo. En definitiva, la temperatura de ensayo y la velocidad de carga están relacionadas.

En la figura 4.5 se muestra como las dos curvas son muy similares debido al hecho que la mezcla con betún convencional (1) a la temperatura de -5°C ya ha llegado a su máxima fragilidad, por lo tanto, aunque se disminuya la velocidad de carga, las propiedades de la mezcla variarían muy poco. En la figura 4.6, se muestra como para la mezcla con betún convencional (2) se producen las mismas características que con el B 50/70 (1). Si observamos la figura 4.7 se ve como la mezcla con betún modificado

aún no ha llegado a fragilidad máxima y por eso cambia de estado. A  $-5^{\circ}\text{C}$  (1 mm/min) tiene un comportamiento mucho más frágil que a  $-5^{\circ}\text{C}$  (0,1 mm/min) donde el material es mucho más dúctil. La mezcla con betún caucho no muestra diferencias significativas, ya que en los dos casos se observa un comportamiento muy frágil del material.

#### 4.2.4. Estudio de los parámetros obtenidos mediante el ensayo Fénix - Temperatura

A continuación se muestran una serie de gráficas donde se representan todos los parámetros que se obtienen mediante el ensayo Fénix, citados en el capítulo 3, en función de la temperatura de ensayo, con el fin de obtener diversas conclusiones sobre la resistencia a la fisuración y la tenacidad que presentan las cuatro mezclas.

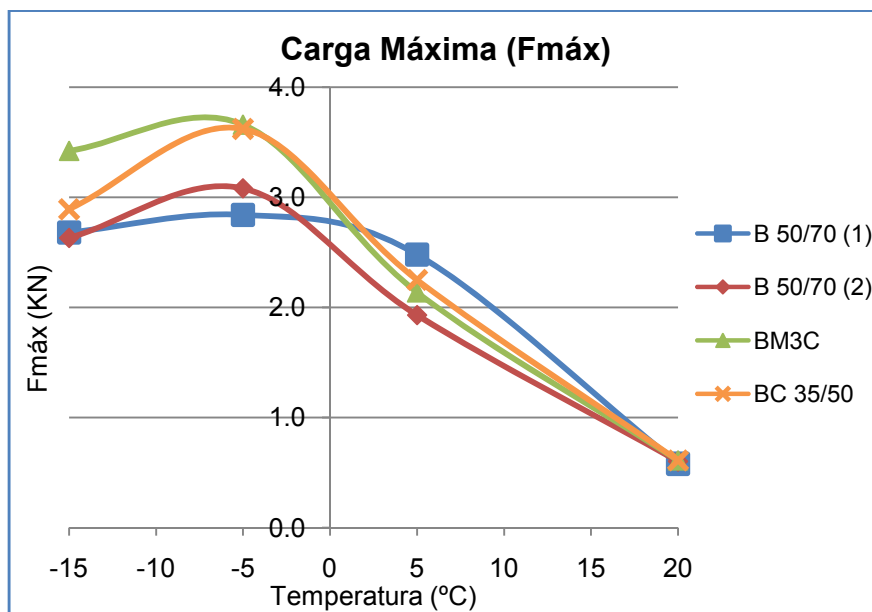
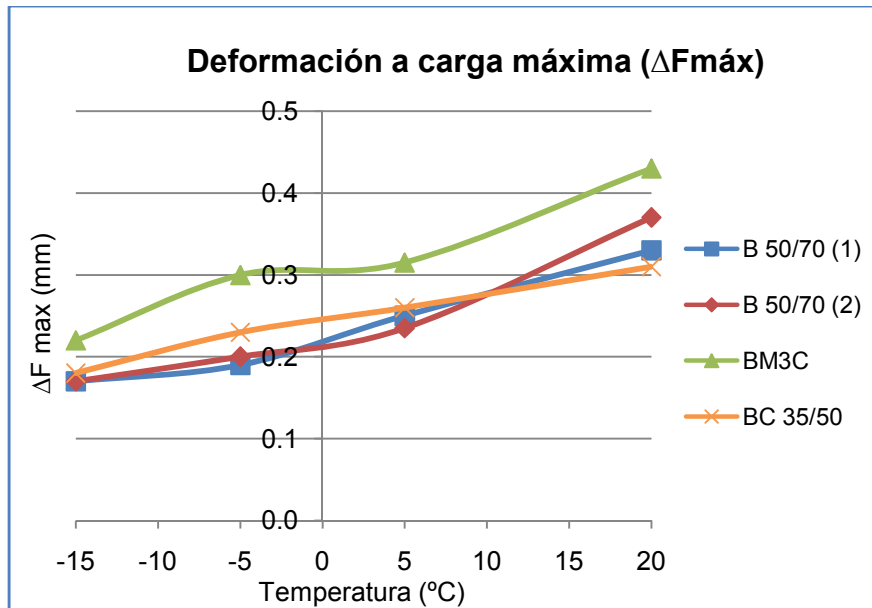


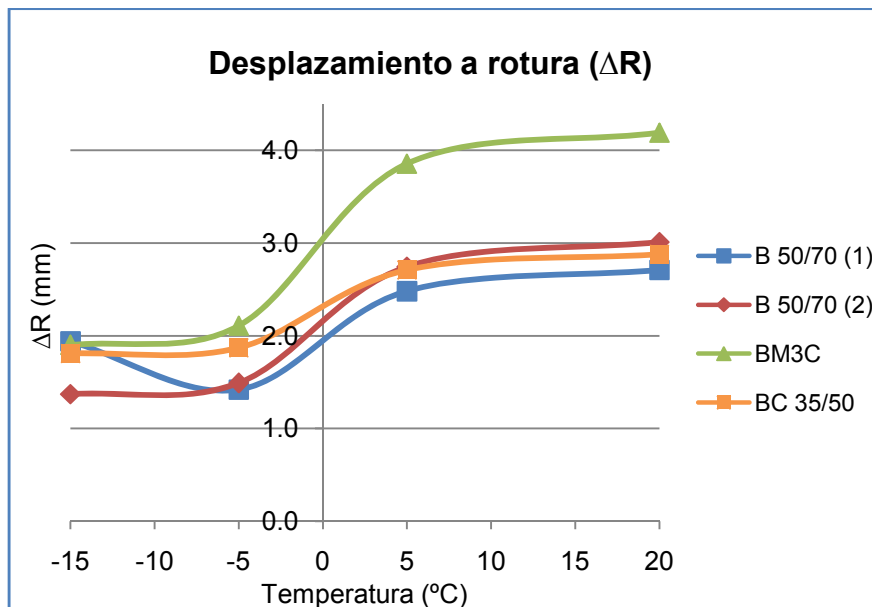
Figura 4. 9. Carga Máxima vs Temperatura.

En la figura 4.9 se observa como a medida que la temperatura aumenta, el valor de la carga máxima va disminuyendo, excepto a la temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$  donde se produce el pico de carga máxima para todas las mezclas. Si se realiza una comparación entre mezclas, se ve claramente como en casi todas las temperaturas, la mezcla del BM3c es la que es capaz resistir mayor carga antes de deformarse. A la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  todas las mezclas se comportan igual.



**Figura 4. 10.** Deformación a Carga Máxima vs Temperatura.

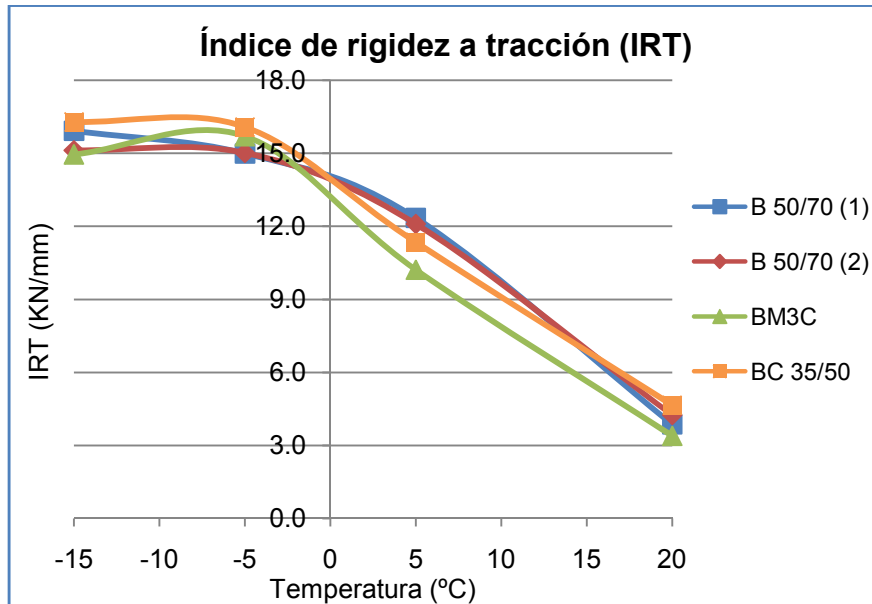
En la figura 4.10 se muestra como conforme la temperatura va aumentando, el valor del desplazamiento a carga máxima para todas las mezclas también aumenta. Si diferenciamos entre las distintas mezclas, la BM3c es la que es capaz de resistir mas carga y también presenta unos valores mayores de desplazamiento a carga máxima (a cualquier temperatura).



**Figura 4. 11.** Desplazamiento a Rotura vs Temperatura.

El parámetro  $\Delta R$  (mm desplazados hasta la rotura) nos permite calcular la energía disipada en el proceso de fractura y diferenciar entre una mezcla más frágil y otra más dúctil. En la figura 4.11 se observa como a medida que la temperatura aumenta, el valor del desplazamiento a rotura también lo hace. En todas las temperaturas, la

mezcla formada por el betún modificado es la más dúctil y a medida que se va incrementando la temperatura de ensayo aumenta la ductilidad de la mezcla. Las otras tres mezclas, presentan un comportamiento similar entre ellas, sobre todo a la temperatura de 20°C, y muestran un comportamiento más frágil del material, sobre todo a temperaturas bajas.

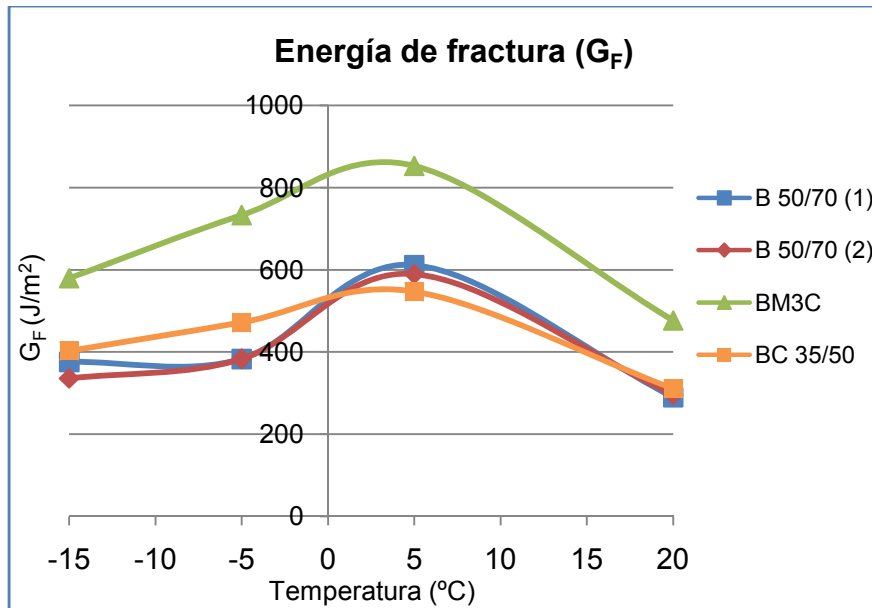


**Figura 4. 12.** Índice de rigidez a tracción vs Temperatura.

El índice de rigidez a tracción representa la flexibilidad o la rigidez de la mezcla. En la figura 4.12 se observa como a medida que se aumenta la temperatura, la mezcla se vuelve más flexible, presenta valores más bajos de resistencia a tracción. Un valor alto del IRT refleja mezclas rígidas que soportan menos deformaciones y llegan antes a la rotura (frágiles), como la formada por el betún de caucho respecto las otras mezclas, ya que presenta el mayor valor de IRT a lo largo de todas las temperaturas. La mezcla más flexible sería la formada por el betún modificado.

Este índice es sensible al contenido de ligante, mostrando una tendencia a disminuir a medida que la temperatura de ensayo aumenta, cuando la mezcla adquiere más flexibilidad (ductilidad).





**Figura 4. 13.** Energía de fractura vs Temperatura.

La energía de fractura se define como el trabajo realizado en el proceso de fisuración dividido por el área de fractura.

En la figura 4.13 se observa como a la temperatura extrema de  $-15^{\circ}\text{C}$  las mezclas son muy frágiles al presentar unos valores bajos de energía de fractura, mientras que a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  ocurre lo contrario, las mezclas también tienen unos valores bajos de  $G_F$  pero presentan un comportamiento demasiado dúctil del material. La energía de fractura disminuye cuando el material es muy frágil o es muy dúctil. Alrededor de la temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$  es donde se da el comportamiento óptimo frente a la fisuración de la mezcla ya que es donde las mezclas presentan valores mayores de energía de fractura.

Del mismo modo, se ve claramente diferenciada que la mezcla con betún modificado es que la presenta un mejor comportamiento frente a la fisuración, al tener mayores valores del desplazamiento a rotura incrementándose así la energía de fractura. Mientras que las otras tres mezclas tienen un comportamiento similar y son más frágiles.

Si se incrementa el valor de energía de fractura la mezcla presentará un mejor comportamiento a la fisuración, debido a que se requiere más energía para iniciar y propagar las fisuras del firme.

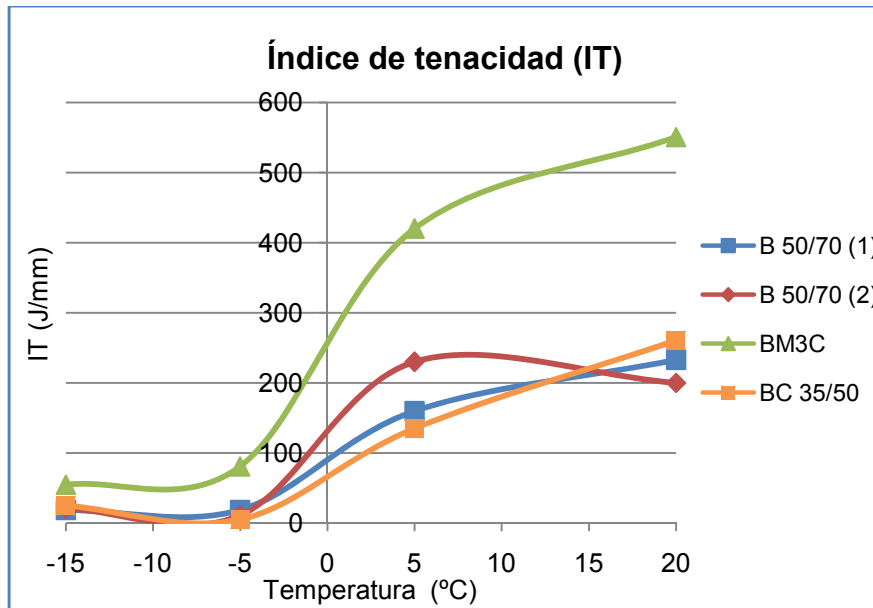


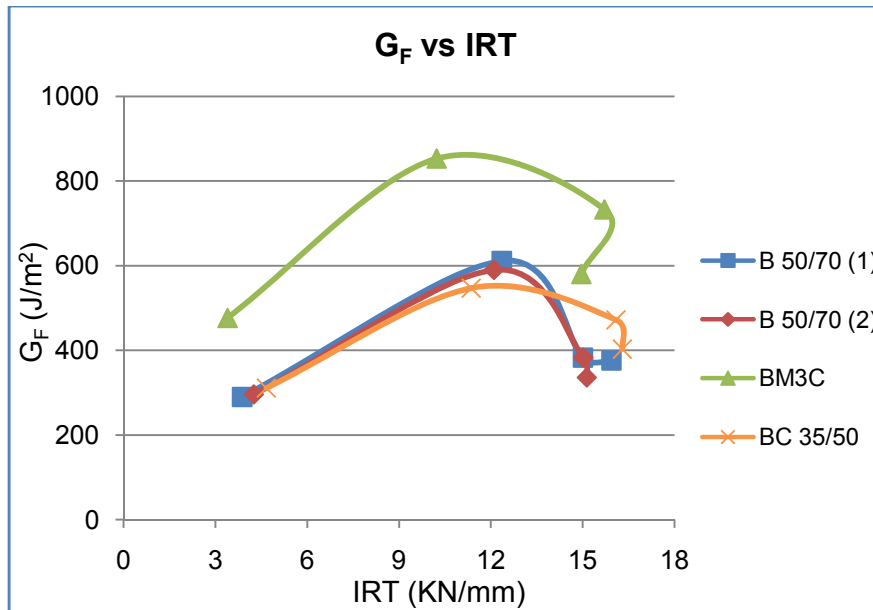
Figura 4. 14. Índice de tenacidad vs Temperatura.

El índice de tenacidad se define como la energía disipada en el periodo de softening multiplicada por un factor de fragilidad. Nos da una idea de la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ya ha alcanzado su resistencia máxima. Los resultados del estudio experimental reflejan que conforme aumenta la temperatura la mezcla se vuelve más tenaz. En la figura 4.14 queda perfectamente reflejada la mayor tenacidad del betún BM3c presentando una mayor ductilidad frente a grandes deformaciones. Las otras tres mezclas, las formadas por los dos betunes convencionales y el betún de caucho presentan un comportamiento similar para las cuatro temperaturas analizadas, mostrando una mayor fragilidad que el betún modificado.

#### 4.2.5. Energía de fractura - Índice de Rigidez a Tracción

En este apartado se refleja una comparación entre dos de los parámetros más importantes que se extraen del ensayo Fénix, ya que reflejan muy bien, como son las propiedades, las características y el comportamiento de las mezclas en unas determinadas condiciones.

Con el objetivo, de analizar el comportamiento de las mezcla de una manera exhaustiva, a continuación se muestra la gráfica que relaciona la energía de fractura que puede tener una mezcla con su rigidez.



**Figura 4. 15.** Energía de fractura vs Índice de rigidez a tracción.

Como se ha comentado anteriormente, si se incrementa el valor de la energía de fractura, la mezcla presentará un mejor comportamiento a la fisuración, debido a que se requiere más energía para iniciar y propagar las fisuras del firme.

En la figura 4.15, se observa como conforme aumenta el índice de rigidez a tracción, la energía de fractura también lo hace, hasta un punto óptimo donde las mezclas aguantarían mucha carga máxima, y a su vez, podrían soportar mucha deformación antes de romperse (ductilidad). A partir de este punto óptimo los valores de las dos variables decrecen, entre las temperaturas de  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $-15^{\circ}\text{C}$  donde el IRT no varía prácticamente y en cambio, la energía de fractura disminuye considerablemente.

### 4.3. Ensayo de fatiga en cuatro puntos

#### 4.3.1. Densidad Aparente y Contenido de Huecos

Se han ensayado un total de 40 probetas para el ensayo de fatiga en cuatro puntos. A continuación, se presenta una tabla donde se muestran las densidades, el contenido de huecos, la desviación típica y el coeficiente de variación promedios para cada serie de probetas (en función del tipo de betún) de cada una de las mezclas. Es decir, el valor promedio de cada serie formada por 10 probetas.

<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Densidad Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Contenido de Huecos (%)</b>	<b>Desviación Típica</b>	<b>Coeficiente de Variación (%)</b>
<b>B 50/70 (1)</b>	2,392	4,1	0,01177	0,49
<b>B 50/70 (2)</b>	2,394	4,1	0,01164	0,48
<b>BM3C</b>	2,397	3,9	0,01342	0,56
<b>BC 35/50</b>	2,375	4,8	0,01097	0,46

**Tabla 4. 2.** Densidad aparente, contenido de huecos, desviación típica y coeficiente de variación (valores promedio ensayo de fatiga).

Como se ha comentado anteriormente, la desviación estándar informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética (promedio).

El coeficiente de variación es una medida de dispersión que sirve para comparar variables que están relacionadas estadísticamente pero que están a distintas escalas.

Como se puede observar en la tabla 4.16, todos los valores obtenidos correspondientes a la desviación típica y al coeficiente de variación son bajos, concretamente, para el  $C_v$  a menor valor, mayor homogeneidad en los valores de la variable (densidad aparente).

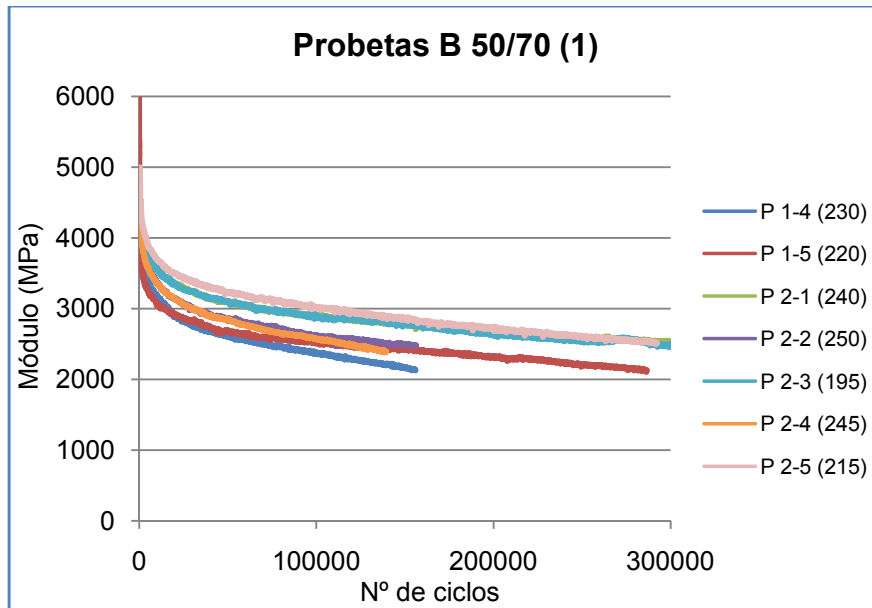
Por lo tanto, los valores de cada probeta y el valor promedio de todas las probetas son muy similares, tal y como demuestran la desviación típica y el coeficiente de variación, como también pasaba para las probetas fabricadas para el ensayo Fénix.

En el *Anejo 5: Ensayo de fatiga en cuatro puntos. Densidades y Contenido de Huecos* se encuentra la densidad aparente, el contenido de huecos, la desviación estándar y el coeficiente de variación correspondiente a cada probeta, y a cada una de las placas.

#### **4.3.2. Gráficos Módulo - Nº de ciclos hasta el fallo**

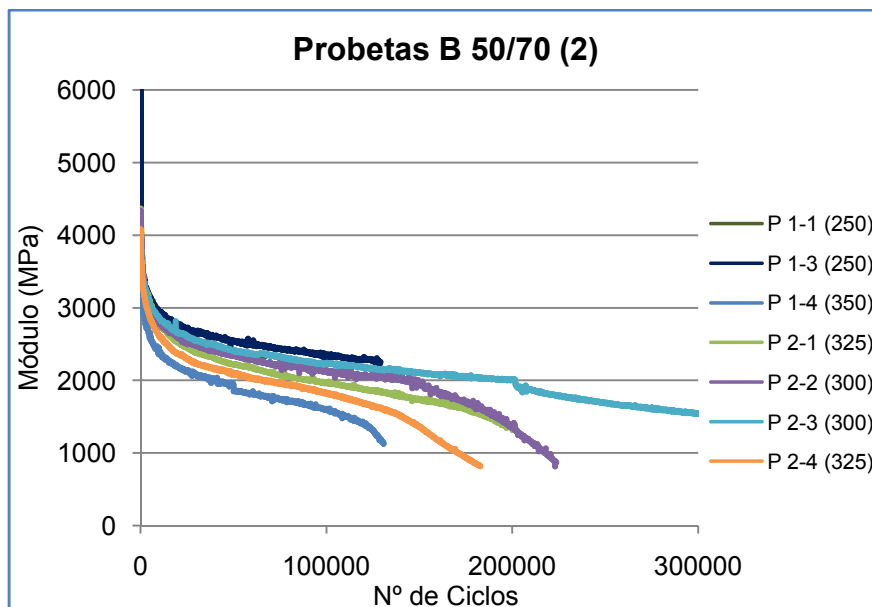
Una vez todas las probetas ya han sido ensayadas, con los datos experimentales obtenidos del ensayo se grafican en primer lugar las curvas Módulo - Nº de ciclos hasta el fallo. Con estas gráficas se puede observar si las probetas han llegado al fallo producido por fatiga con el fin de establecer una ley de fatiga correcta para cada mezcla. Para ello, se les aplica una deformación inicial a una frecuencia constante de 10 Hz y se van fatigando hasta que llegan al 50% de su módulo inicial donde se produce el fallo, tal y como se establece en la Normativa Europea UNE-EN 12697-8. En todas las mezclas, se ha ido variando la deformación inicial con el objeto de analizar el comportamiento frente al fallo producido por la fatiga de dichas mezclas.

A continuación se presentan las curvas obtenidas Módulo - Nº de ciclos hasta el fallo para cada tipo de mezcla.



**Figura 4. 16.** Gráfico Módulo - N° de ciclos hasta el fallo para el betón B 50/70 (1).

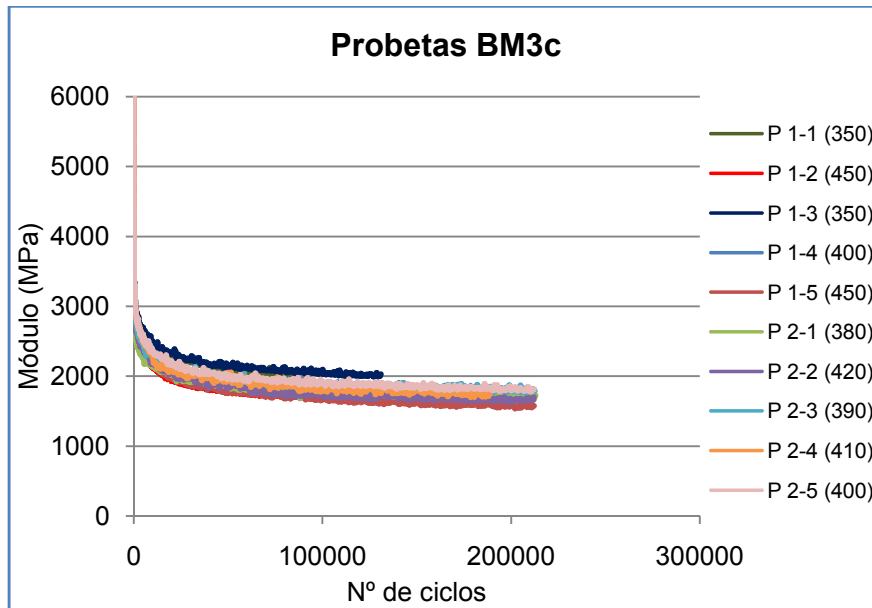
Para todas las mezclas, se ensayaron 10 probetas. Como se puede observar en la figura 4.17 solamente se han graficado las 7 últimas. Las tres primeras probetas se descartaron por un error con la maquinaria de ensayo. Con las 7 probetas graficadas se puede observar como claramente ninguna de ellas llega al fallo por fatiga, sino que necesitan más ciclos para fatigarse. Este hecho, demuestra que el fallo no se produce al 50% del módulo inicial, sino que aparece cuando este llega alrededor del 20 - 30%, para esta mezcla.



**Figura 4. 17.** Gráfico Módulo - N° de ciclos para el betón B 50/70 (2).

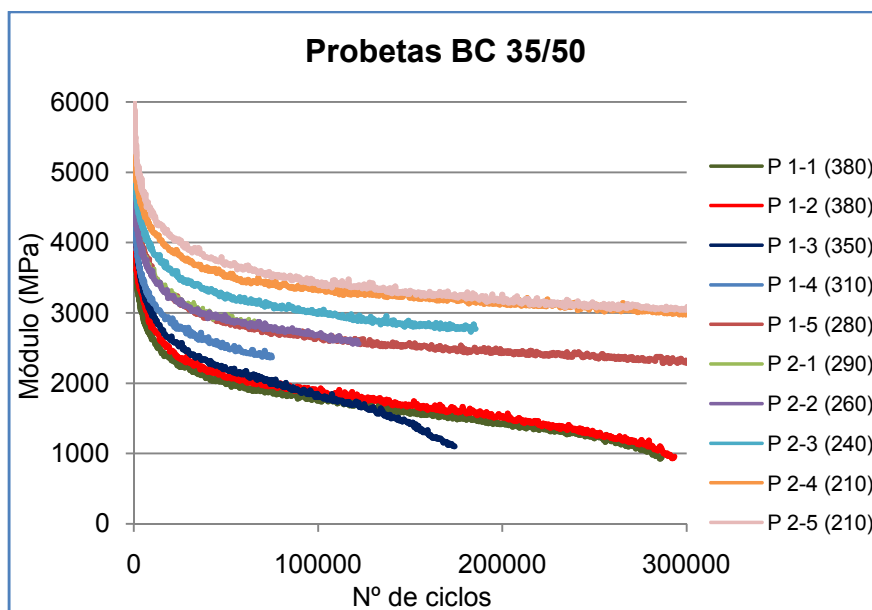
En la figura 4.18 solo se graficaron 7 probetas debido a que las tres que faltan no llegaron al 50 % del módulo inicial por un error de la máquina, por lo que quedan fuera

de rango y no se consideran fiables. Se puede observar, como en este caso, concretamente las probetas 1-4, 2-1, 2-2 y 2-4 han llegado al fallo por fatiga, mientras que las demás, necesitarían un mayor número de ciclos para llegar al fallo por fatiga.



**Figura 4. 18.** Gráfico Módulo - N° de ciclos para el betón BM3c.

Para la mezcla formada por el betón modificado, se aprecia claramente como todas las probetas tienen un mismo comportamiento a fatiga, pero igual que en los casos anteriores, el criterio que establece la Normativa Europea de dejar el ensayo hasta el 50 % del módulo inicial, no sería suficiente para obtener unos resultados fiables, y poder establecer así, una ley de fatiga correcta.

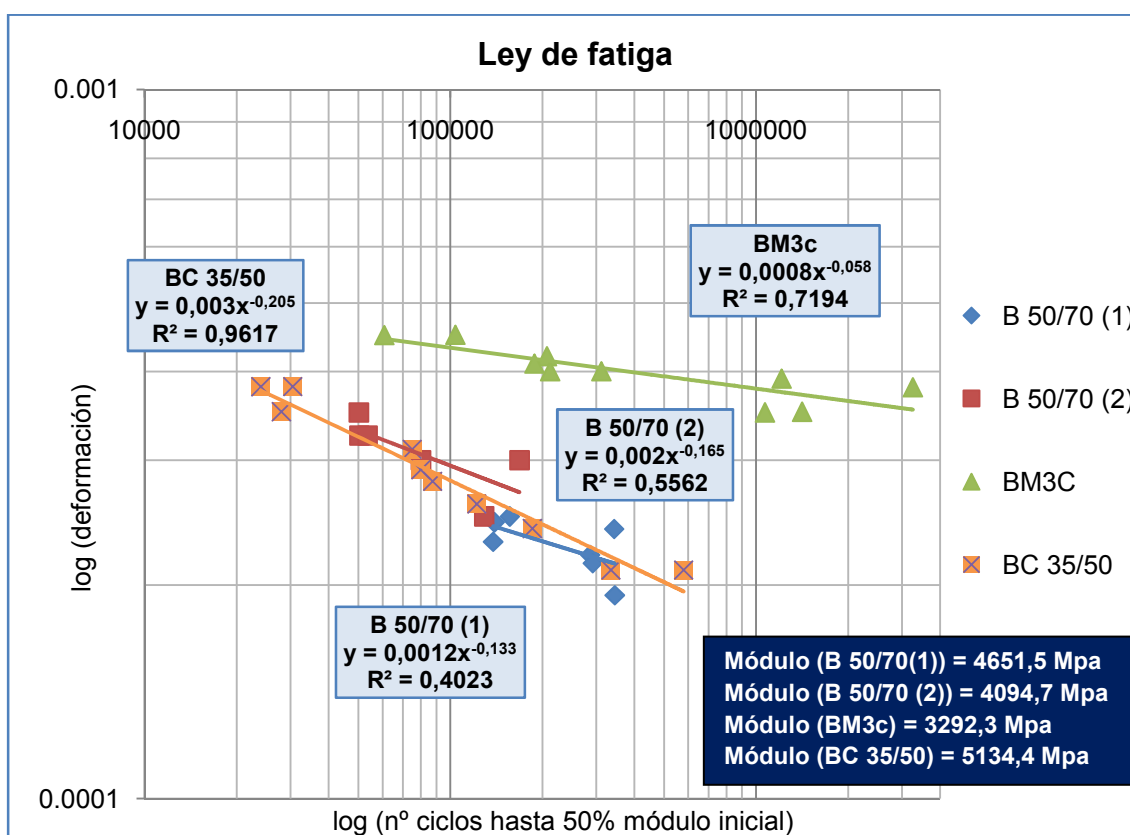


**Figura 4. 19.** Gráfico Módulo - N° de ciclos para el betón BC 35/50.

Finalmente, para la mezcla formada por betún caucho, se puede observar como únicamente las probetas 1-1, 1-2 y 1-3 presentan una ligera tendencia al fallo, mientras que las demás probetas, como en las anteriores mezclas, sería necesario alargar el ensayo hasta un 20-30% del modulo inicial e imponer una mayor deformación, para conseguir unos resultados fiables.

#### 4.3.3. Leyes de fatiga

Una vez procesados los datos extraídos del ensayo a flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas se puede elaborar la correspondiente ley de fatiga expresada mediante "Nº de ciclos hasta el fallo - Deformación inicial". A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada mezcla.



**Figura 4. 20.** Ley de fatiga de las cuatro mezclas.

En la figura 4.21 se muestra la ley de fatiga de las cuatro mezclas analizadas, con sus correspondientes líneas de tendencia. El factor  $R^2$  corresponde al factor de correlación entre los valores puntuales resultantes del ensayo y la recta interpolada de tendencia de los resultados. Cuanto más se aproxime a 1 menor dispersión habrá en los resultados. Tal y como ya se apreciaba en la figura 4.20, la mezcla con betún caucho es la más fiable, ya que es la que presenta más probetas que llegan al fallo al 50% del modulo inicial y por lo tanto, estas probetas se pueden considerar como correctas para establecer la ley de fatiga y no hay dispersión de los datos, mientras que las otras, solo son estimaciones. Esto se refleja en el coeficiente de correlación, el cual es próximo a la unidad para la mezcla de betún caucho, mientras que en las otras



mezclas, queda claramente reflejado que los datos experimentales obtenidos mediante el ensayo no son fiables debido a que las probetas no fallaron.

Se puede observar como todas las leyes de fatiga resultantes cumplen con la normativa PG-3, que marca un mínimo de 100 microdeformaciones (0,0001 mm/mm) para  $10^6$  ciclos de carga. Todas ellas están por encima de este valor.

En cuanto a la variación de la inclinación de las leyes de fatiga, se muestra que cuanto menor es la inclinación, hay una mayor susceptibilidad a las deformaciones debido a la mayor rigidez de estas mezclas. Las líneas que estén situadas más hacia arriba y sean más inclinadas, presentaran un comportamiento más dúctil del material.

#### 4.4. Relación entre el ensayo Fénix y el de Fatiga

En este apartado se pretende establecer una correlación entre el ensayo Fénix (resistencia a la fisuración) y el ensayo de fatiga en cuatro puntos (fallo hasta la fatiga). Como se ha comentado en apartados anteriores, los resultados del ensayo de fatiga no han sido fiables debido a la no rotura de las probetas y a problemas ocasionados por la propia máquina que hizo que algunas probetas fueran descartadas, por lo que en este apartado los resultados obtenidos se deben considerar como estimaciones.

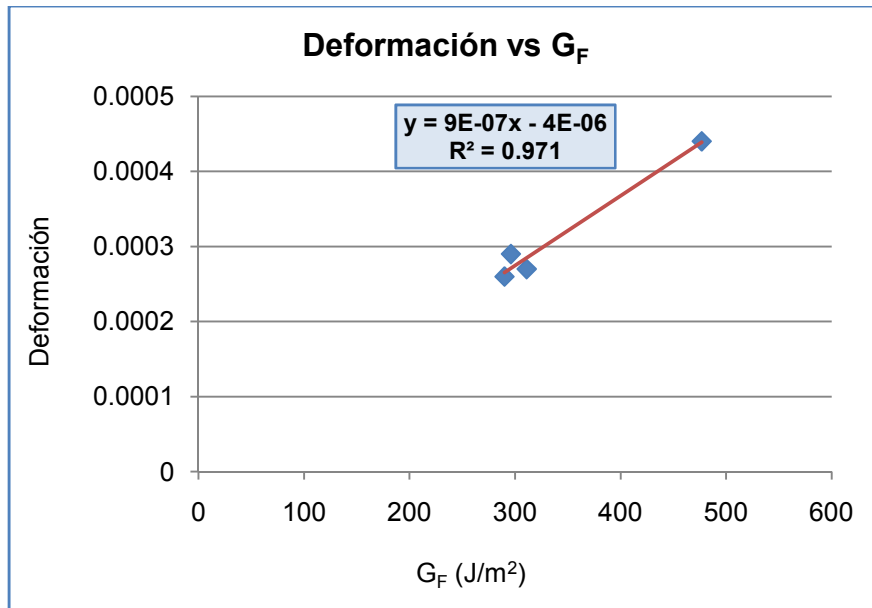
Aún así, se ha establecido una comparación entre la energía de fractura obtenida mediante el ensayo Fénix a 20°C y entre la deformación a fatiga, de las cuatro mezclas. También se ha comparado el parámetro de desplazamiento a carga máxima obtenido mediante el ensayo Fénix, también a 20°C, con la deformación a fatiga de las mezclas. Para obtener la deformación de las cuatro mezclas, se ha considerado el valor correspondiente a los 100.000 ciclos de la ley de fatiga.

A continuación se presenta una tabla donde se muestran todos los valores correspondientes a los dos ensayos:

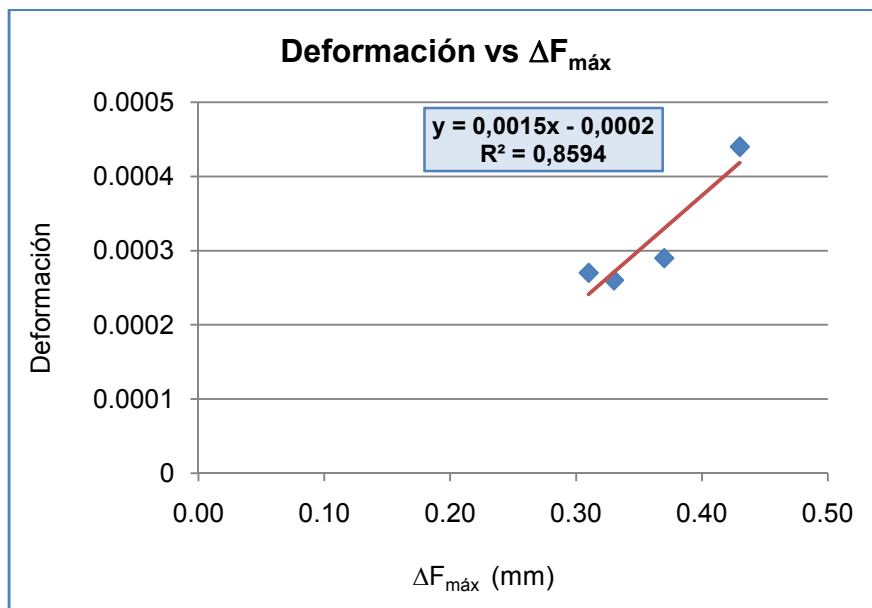
<i>Tipo de mezcla</i>	<i>Deformación (mm/mm)</i>	<i><math>G_F</math> (J/m<sup>2</sup>)</i>	<i><math>\Delta F_{m\acute{a}x}</math> (mm)</i>
<b>Betún B 50/70 (1)</b>	0,00026	290	0,33
<b>Betún B 50/70 (2)</b>	0,00029	296	0,37
<b>Betún BM3C</b>	0,00044	477	0,43
<b>Betún BC 35/50</b>	0,00027	311	0,31

**Tabla 4. 3.** Relación entre el ensayo Fénix y el de fatiga en cuatro puntos.

A continuación se presentan las gráficas de los parámetros relacionados:



**Figura 4. 21.** Gráfico Deformación vs  $G_F$ .



**Figura 4. 22.** Deformación vs  $\Delta F_{\text{máx}}$ .

En las dos figuras anteriores, se observa como existe una tendencia lineal entre los parámetros del ensayo Fénix y las deformaciones obtenidas mediante el ensayo de fatiga.

En la figura 4.22 se muestra como a medida que la deformación aumenta, la energía de fractura también lo hace, y al revés. El factor de correlación obtenido mediante la línea de tendencia demuestra que existe poca dispersión entre los resultados, y por lo tanto, que la relación existente se puede considerar más o menos correcta.

En la figura 4.23 se aprecia como a medida que la deformación aumenta, el desplazamiento a carga máxima también lo hace. En este caso, existe más dispersión entre las dos variables, por lo que el ajuste no se podría considerar como exacto, pero si aproximado.



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Los fallos por fisuración de las mezclas bituminosas son unos de los deterioros más frecuentes en las carreteras, y dentro de ellos, la fisuración debida a las condiciones climáticas a las que están expuestas las carreteras, a las cargas del tráfico y a la fatiga, lo cual trae consigo serias aplicaciones económicas a medida que estos deterioros progresan con el tiempo.

Para ello, la presente tesina se ha basado en dos líneas de investigación. La primera, ha tenido como objetivo el estudio de la resistencia a la fisuración de los pavimentos que están sometidos a bajas temperaturas. Con este objetivo, se ha desarrollado el ensayo Fénix, un nuevo procedimiento experimental, práctico y fácil de emplear que es capaz de evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con su comportamiento frente al fallo por fisuración. La segunda línea de investigación, ha consistido en ensayar las mismas mezclas utilizadas para el ensayo Fénix, ahora con el ensayo de fatiga en cuatro puntos, para evaluar su comportamiento frente al fallo por fatiga, y poder establecer una relación entre las propiedades mecánicas de las mezclas que se obtienen con los dos ensayos.

Para cumplir con el desarrollo de las líneas de investigación se han realizado las siguientes funciones:

- Revisión exhaustiva en la literatura de los ensayos que se han utilizado hasta el momento para la representación y análisis de los mecanismos de fisuración.
- Desarrollo de una campaña experimental (fabricación de probetas), para posteriormente analizar las distintas mezclas mediante los ensayos a fisuración y a fatiga.

- Análisis a fisuración de las probetas mediante el ensayo Fénix. Se ha analizado la influencia del tipo de ligante (B 50/70 (1), B 50/70 (2), BM3c y BC 35/50), la influencia de la temperatura de ensayo (20, 5, -5 y -15°C) y la velocidad de aplicación de carga (1 y 0,1 mm/min). También se han estudiado las propiedades mecánicas de las mezclas obtenidas mediante dicho ensayo.
- Análisis a fatiga de las probetas mediante el ensayo de fatiga en cuatro puntos. Se ha analizado la influencia que tiene el tipo de ligante (B 50/70 (1), B 50/70 (2), BM3c y BC 35/50) y la influencia de la deformación aplicada. El ensayo de fatiga únicamente se ha realizado a la temperatura de 20°C, tal y como establece la Normativa Europea.
- Análisis de la relación entre propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas obtenidas mediante el ensayo Fénix y su comportamiento a deformación por fatiga.

### *Primera línea de investigación: Ensayo Fénix*

A partir del análisis de los resultados obtenidos en la primera etapa experimental, destinada a evaluar el comportamiento de las distintas mezclas en función de la temperatura de ensayo; y las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en función de las diversas variables, se puede concluir que:

- Al analizar las diferentes mezclas en función del tipo de betún utilizado en la mezcla y la temperatura de ensayo, se ha puesto de manifiesto el mejor comportamiento del ligante modificado, BM3c, respecto los demás ligantes evaluados. La mezcla fabricada con el betún modificado con polímeros fue capaz de alcanzar mayores deformaciones antes de romper que las mezclas fabricadas con betunes convencionales o de caucho, disipando una mayor cantidad de energía en su proceso de fisuración (mayor  $G_F$ ) y mostrando un comportamiento más tenaz (mayor  $I_T$ ). Cabe destacar que a la temperatura de 20°C, las cuatro mezclas analizadas presentan el mismo comportamiento.
- Al analizar las diferentes mezclas a la temperatura de -5°C y variando la velocidad de aplicación de carga, se ha podido observar como al bajar la velocidad, la respuesta de las mezclas es menos rígida y más dúctil, lo que equivale a aumentar la temperatura de ensayo. En este caso, se muestra como la mezcla formada por el BM3c es la única que a la temperatura de -5°C no llega a fragilizar y aun sigue deformándose, mientras que las demás presentan un comportamiento muy frágil del material.
- En el estudio de los parámetros mecánicos que se obtienen mediante el ensayo Fénix en función de la temperatura se puede observar que:
  - A medida que la temperatura aumenta, el valor del desplazamiento a rotura también lo hace y las mezclas se vuelven más flexibles, presentando valores más bajos de IRT; y más tenaces (mayor IT).

- A la temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$  es donde las mezclas presentan un comportamiento óptimo a la fisuración (mayor  $G_F$ ).
- Cabe destacar el hecho que en la evaluación de todos los parámetros mecánicos, la mezcla formada por el betún BM3c es la que presenta un mejor comportamiento a la fisuración con elevados valores de  $G_F$  y  $IT$ , lo que refleja que requerirá más energía para iniciar y propagar las fisuras del firme.
- Se ha podido observar una buena repetitividad de los datos, ensayándose grupos de 3 probetas para cada mezcla. Se obtienen dispersiones mínimas que dan fiabilidad a los datos presentados.

Los trabajos de investigación y el análisis de los resultados realizados en la primera línea de investigación, dirigidos a evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas relacionadas con su fallo por fisuración, han permitido establecer las siguientes conclusiones generales:

- El procedimiento experimental del ensayo Fénix es apropiado para evaluar la respuesta frente a la fisuración que experimentan las mezclas bituminosas en el firme.
- Mediante el ensayo se pueden determinar parámetros que representan las principales propiedades mecánicas que caracterizan el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a la fisuración.
- La energía disipada en el proceso de fractura,  $G_F$ , calculada mediante las curvas Tensión - Desplazamiento obtenidas del ensayo Fénix, permite caracterizar las mezclas bituminosas en todo su proceso de fisuración, desde el inicio de la fisura hasta la fractura total.
- La sensibilidad mostrada por el procedimiento del ensayo, permite diferenciar claramente el comportamiento de los betunes más blandos de los más duros.

Cabe recordar que los resultados obtenidos en esta tesina no se pueden considerar como definitivos, pero sí orientativos para próximas investigaciones en estos tipos de mezcla.



### *Segunda línea de investigación: Ensayo de Fatiga en cuatro puntos*

A partir del análisis de los resultados obtenidos en la segunda etapa experimental, destinada a evaluar el comportamiento a fatiga de las distintas mezclas en función del tipo de ligante y de la deformación aplicada, se puede concluir que:

- Al analizar las relaciones entre el "Módulo - N° de ciclos hasta el fallo" de todas las probetas para determinar su comportamiento a fatiga hasta el fallo, se pudo observar como muy pocas de ellas llegaron a la rotura. Esto se debe a que, según la Normativa Europea, el ensayo de Fatiga debe aplicarse hasta el 50% del módulo inicial. Cuando la máquina llega a este valor, se para y en teoría la mezcla bituminosa ya ha alcanzado "el fallo". Mediante el análisis de las probetas se demostró que el umbral del 50% del módulo inicial no es suficiente para llegar al fallo, si no que se necesita alargar el ensayo hasta el 20-30% del módulo inicial.
- Se han graficado las leyes de fatiga de las cuatro mezclas y se les ha aplicado una línea de tendencia con su correspondiente factor de correlación,  $R^2$ . En términos generales, las líneas situadas más hacia arriba e inclinadas, son las que presentan un comportamiento más dúctil del material.
- Se relacionó el valor de energía de fractura,  $G_F$ , y del desplazamiento a carga máxima,  $\Delta F_{m\acute{a}x}$ , obtenidos mediante el ensayo Fénix, con el valor de deformación a fatiga obtenidos mediante el ensayo de fatiga en cuatro puntos, a la temperatura de 20°C. Se ha podido apreciar la tendencia lineal que presentan estas variables, de manera que si aumenta una, la otra también lo hace, y al revés.

### *Futuras líneas de investigación*

Uno de los principales objetivos sería evaluar, mediante el nuevo ensayo experimental Fénix, las propiedades mecánicas en otra gama de mezclas bituminosas, variando granulometrías, tipos de ligantes y temperaturas de ensayo, con el fin de caracterizar mecánicamente una mayor tipología de mezclas bituminosas utilizadas en un ámbito internacional.

También se plantea evaluar el comportamiento a fatiga de un mayor número de mezclas para observar si los parámetros obtenidos en el ensayo Fénix siguen las tendencias y correlaciones encontradas en la presente tesina.

## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Altamirano, L. F. Deterioro de pavimentos rígidos. Metodología de medición, posibles causas de deterioro y reparaciones, 2007.
- [2] Gutiérrez, F. A. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Bogotá D.C., 2006.
- [3] Tino, R. Las carreteras y sus firmes. *Cimbra: Revista del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas*. No. 382, 2008.
- [4] Castro, J. R., Colóssio, J. R. y Quispe, R. Metodología de cálculo de la temperatura de ruptura de pavimentos sometidos a bajas temperaturas y causas probables de fisuramiento. *XII Congreso Ibero - Latinoamericano del Asfalto*. Ecuador, 2011.
- [5] Jung, D. y Vinson, T. Low - Temperature Cracking: Test Selection. *Strategic Highway Research Program*. Washington D.C., 1994.
- [6] Wagoner, M., Buttlar, W. y Paulino, G. Disk - shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture. *Society for Experimental Mechanics*, Vol. 45, No. 3, pp. 270-277, 2005.
- [7] Li, X. y Marasteanu, M. Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. *Society for Experimental Mechanics*, Vol. 50, pp. 867-876, 2009.
- [8] Wagoner, M., Buttlar, W. y Paulino G. Development of a Single - Edge Notched Beam Test for Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 33, No. 6, 2005.

[9] Koh, C., Lopp, G. y Roque, R. Development of a Dog - Bone Direct Tension Test (DBDT) for asphalt concrete. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Vol. 1, pp. 585-596, 2009.

[10] Valdés, G., Pérez-Jiménez, F. E., Miró, R., Martínez, A. H. y Amorós, J. Desarrollo de un nuevo ensayo experimental para la evaluación de la resistencia a tracción directa y la energía disipada en el proceso de fractura en mezclas asfálticas. *XV Congreso Ibero - Latinoamericano del Asfalto*, 2009.

[11] Valdés, G., Pérez-Jiménez, F. E. y Botella, R. Ensayo Fénix, una nueva metodología para medir la resistencia a la fisuración en mezclas asfálticas. *Revista de la Construcción*, Vol. 8, núm. 1, pp. 114-125, 2009.

### OTRA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Kandhal, P. y Chakraborty, S. Effect of Asphalt Film Thickness on Short and Long Term Aging of Asphalt Paving Mixtures. *National Center for Paving Technology*, TRB, USA.

Li, X., Braham, A., Marasteanu, M., Buttlar, W. y Williams, R. Effect of Factors Affecting Fracture Energy of Asphalt Concrete at Low Temperature. *Third EATA conference, European Asphalt Technology Association*, pp. 397-416, 2008.

Molenaar, A., Scarpas, A., Li, X. y Erkens, S. Semi - Circular Bending Test; Simple but Useful?. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, pp. 795-815, 2002.

Valdés, G. Evaluación del proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental - Ensayo Fénix -. *Tesis Doctoral*, ETSECCPB, UPC, Barcelona, 2011.

## **ANEJO 1: ENSAYO FÉNIX**

### ***DATOS EXPERIMENTALES***

En el presente anejo se presentan los valores de las alturas, pesos y densidades de cada una de las probetas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB. También se presentan los valores de la distancia total y la distancia de ranura para cada cara de las probetas, una vez ya han sido divididas en dos partes (Parte A y B).

**MEZCLA CON BETÓN B 50/70 (2)**

**PROYECTO MADISON**

<b>Probeta</b>	<b>H1 (mm)</b>	<b>H2 (mm)</b>	<b>H3 (mm)</b>	<b>Hm (mm)</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>Peso sumergido (g)</b>	<b>P.S.S.S (g)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad Media (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	64,4	65,3	65,0	64,9	1249,8	725,6	1251,5	2,376	1,426
<b>2</b>	65,0	65,5	64,9	65,1	1250,2	726,4	1251,8	2,380	
<b>3</b>	65,1	65,1	65,7	65,3	1250,7	726,5	1252,4	2,378	
<b>4</b>	65,2	65,6	65,2	65,3	1253,8	729,8	1255,8	2,384	
<b>5</b>	65,3	66,0	65,5	65,6	1254,6	729,4	1256,9	2,378	
<b>6</b>	65,0	64,6	65,5	65,0	1254,0	729,3	1256,0	2,381	
<b>7</b>	65,4	65,8	66,6	65,9	1250,6	724,7	1252,6	2,369	
<b>8</b>	65,3	65,7	66,3	65,8	1255,2	729,7	1257,3	2,379	
<b>9</b>	65,7	65,8	66,1	65,9	1251,1	725,2	1253,3	2,369	

**MEZCLA CON BETÓN B 50/70 (1)**

**PROYECTO MADISON**

<b>Probeta</b>	<b>H1 (mm)</b>	<b>H2 (mm)</b>	<b>H3 (mm)</b>	<b>Hm (mm)</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>Peso sumergido (g)</b>	<b>P.S.S.S (g)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad Media (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>10</b>	65,7	65,3	65,6	65,5	1247,6	722,1	1248,3	2,371	1,428
<b>11</b>	65,6	65,4	65,5	65,5	1253,8	727,9	1254,6	2,380	
<b>12</b>	65,5	65,6	66,0	65,7	1254,2	727,0	1255,2	2,374	
<b>13</b>	66,0	65,9	66,0	66,0	1256,7	729,1	1257,8	2,377	
<b>14</b>	65,6	65,5	65,8	65,6	1257,8	731,1	1259,1	2,382	
<b>15</b>	65,3	65,3	65,8	65,5	1254,3	730,4	1255,1	2,391	
<b>16</b>	65,3	65,8	65,9	65,7	1258,1	732,3	1258,9	2,389	
<b>17</b>	65,4	65,4	65,8	65,5	1252,4	727,7	1253,5	2,382	
<b>18</b>	65,8	66,0	66,3	66,0	1255,6	728,6	1257,2	2,375	

**MEZCLA CON BETÓN BM3c**

**PROYECTO MADISON**

Probeta	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )
19	64,6	64,9	65,3	64,9	1246,3	726,2	1248,2	2,388	1,433
20	65,0	65,2	65,3	65,2	1246,5	726,5	1249,0	2,386	
21	65,4	65,9	65,9	65,7	1258,1	734,7	1260,2	2,394	
22	65,5	65,1	65,2	65,3	1249,6	729,1	1251,5	2,392	
23	64,7	64,7	65,5	65,0	1252,2	730,4	1254,6	2,389	
24	65,3	65,1	64,8	65,1	1246,5	727,0	1248,3	2,391	
25	65,8	66,7	65,5	66,0	1260,2	733,8	1262,6	2,383	
26	65,8	65,9	65,0	65,6	1253,8	730,8	1256,1	2,387	
27	65,5	65,8	65,9	65,7	1258,2	734,6	1260,7	2,392	

**MEZCLA CON BETÓN BC35/50**

**PROYECTO MADISON**

Probeta	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )
28	65,4	64,8	65,5	65,2	1247,4	724,1	1249,5	2,374	1,426
29	64,7	65,0	65,4	65,0	1251,1	726,0	1252,9	2,374	
30	65,4	66,3	65,2	65,6	1254,2	728,2	1256,3	2,375	
31	66,0	66,0	65,3	65,8	1252,2	726,9	1254,4	2,374	
32	66,2	65,5	65,9	65,9	1259,3	731,1	1261,6	2,374	
33	66,3	65,7	65,4	65,8	1253,8	728,6	1256,6	2,375	
34	65,4	65,8	65,6	65,6	1253,3	728,4	1255,5	2,378	
35	65,8	65,8	65,3	65,6	1256,6	731,4	1258,6	2,384	
36	66,2	65,4	65,5	65,7	1254,3	729,3	1256,9	2,377	

**MEZCLA CON BETÓN B 50/70 (2)**

<b>Probeta</b>	<b>H1 (mm)</b>	<b>H2 (mm)</b>	<b>Hm (mm)</b>
<b>1 - A</b>		101,8	
	D.T	50,2	50,2
	D.R	42,7	42,7
<b>1 - B</b>		101,5	
	D.T	48,6	48,7
	D.R	43	41,5
<b>2 - A</b>		101,8	
	D.T	50,4	49,5
	D.R	43,2	41,4
<b>2 - B</b>		101,7	
	D.T	48,5	49,2
	D.R	42,4	42,9
<b>3 - A</b>		101,6	
	D.T	49,8	49
	D.R	42,9	41,5
<b>3 - B</b>		101,5	
	D.T	48,8	49,3
	D.R	42,7	42,7
<b>4 - A</b>		101,7	
	D.T	49,5	49,2
	D.R	42,9	41,8
<b>4 - B</b>		101,5	
	D.T	48,9	49,2
	D.R	42,4	42,7
<b>5 - A</b>		101,6	
	D.T	50	49,2
	D.R	43,1	41,6

<b>5 - B</b>		101,5		
	D.T	48,9	49,2	49,05
	D.R	42,2	43,1	42,65
<b>6 - A</b>		102		
	D.T	49,6	50,4	50
	D.R	43	41,4	42,2
<b>6 - B</b>		101,9		
	D.T	48,7	49,1	48,9
	D.R	43,5	43,7	43,6
<b>7 - A</b>		101,7		
	D.T	49,6	49,7	49,65
	D.R	42,8	41,8	42,3
<b>7 - B</b>		101,6		
	D.T	49,1	48,9	49
	D.R	42,6	42,8	42,7
<b>8 - A</b>		101,1		
	D.T	49,4	48,8	49,1
	D.R	42,5	41,6	42,05
<b>8 - B</b>		101,5		
	D.T	49	49,1	49,05
	D.R	42	42,8	42,4
<b>9 - A</b>		101,7		
	D.T	49,3	49,5	49,4
	D.R	43,4	41,9	42,65
<b>9 - B</b>		101,6		
	D.T	49,3	48,9	49,1
	D.R	43,3	42,9	43,1



**MEZCLA CON BETÚN B 50/70 (1)**

<b>Probeta</b>		<b>H1 (mm)</b>	<b>H2 (mm)</b>	<b>Hm (mm)</b>
<b>10 - A</b>		101,5		
	D.T	49,6	48,7	49,15
	D.R	43,2	42,5	42,85
<b>10 - B</b>		101,5		
	D.T	48,8	49,6	49,2
	D.R	43,5	41,9	42,7
<b>11 - A</b>		101,6		
	D.T	50,2	49,3	49,75
	D.R	42,5	42,7	42,6
<b>11 - B</b>		101,4		
	D.T	48,6	49,1	48,85
	D.R	42,3	41,7	42
<b>12 - A</b>		101,9		
	D.T	50	49,4	49,7
	D.R	43,4	43	43,2
<b>12 - B</b>		101,8		
	D.T	48,5	49,1	48,8
	D.R	42,6	41,9	42,25
<b>13 - A</b>		101,4		
	D.T	50,2	49,8	50
	D.R	42,8	42,9	42,85
<b>13 - B</b>		101,4		
	D.T	48,5	48,6	48,55
	D.R	42,8	41,8	42,3
<b>14 - A</b>		101,9		
	D.T	50,6	50,3	50,45
	D.R	42,8	42,9	42,85

<b>14 - B</b>		101,6		
	D.T	48,1	48,5	48,3
	D.R	43	42,2	42,6
<b>15 - A</b>		101,9		
	D.T	49,9	49,8	49,85
	D.R	42,8	41,6	42,2
<b>15 - B</b>		101,5		
	D.T	48,3	48,7	48,5
	D.R	42,3	42,6	42,45
<b>16 - A</b>		101,6		
	D.T	50,2	49,7	49,95
	D.R	43,1	41,9	42,5
<b>16 - B</b>		101,6		
	D.T	48,8	48,7	48,75
	D.R	42,7	42,9	42,8
<b>17 - A</b>		101,2		
	D.T	50,2	49,5	49,85
	D.R	43,1	42,1	42,6
<b>17 - B</b>		101,6		
	D.T	48,2	48,6	48,4
	D.R	42,5	42,8	42,65
<b>18 - A</b>		101,7		
	D.T	50,8	50,4	50,6
	D.R	42,9	42,1	42,5
<b>18 - B</b>		101,5		
	D.T	47,8	47,8	47,8
	D.R	42	42,7	42,35

### MEZCLA CON BETÚN BM3c

Probeta		H1 (mm)	H2 (mm)	Hm (mm)
19 - A		101,7		
	D.T	49,9	49,5	49,7
	D.R	43,4	42	42,7
19 - B		101,9		
	D.T	48,5	49	48,75
	D.R	42,2	43,1	42,65
20 - A		101,9		
	D.T	48,8	48,5	48,65
	D.R	42,7	42,5	42,6
20 - B		101,7		
	D.T	49,6	50,2	49,9
	D.R	43	42,3	42,65
21 - A		101,7		
	D.T	48,7	48,6	48,65
	D.R	42,9	42,7	42,8
21 - B		101,8		
	D.T	49,8	50,2	50
	D.R	43,4	41,7	42,55
22 - A		101,7		
	D.T	49,1	49	49,05
	D.R	43	42,7	42,85
22 - B		101,7		
	D.T	49,6	49,5	49,55
	D.R	43,2	42,3	42,75
23 - A		101,9		
	D.T	50,5	50,3	50,4
	D.R	43,7	41,9	42,8

23 - B		101,6		
	D.T	48,5	48,4	48,45
	D.R	42,6	43,1	42,85
24 - A		101,5		
	D.T	48,7	48,4	48,55
	D.R	43,4	42,7	43,05
24 - B		101,5		
	D.T	49,8	49,8	49,8
	D.R	43,1	41,8	42,45
25 - A		101,5		
	D.T	48,7	48,6	48,65
	D.R	42,5	42,8	42,65
25 - B		101,6		
	D.T	49,7	49,8	49,75
	D.R	42,9	41,8	42,35
26 - A		101,9		
	D.T	49,1	48,9	49
	D.R	43	42,8	42,9
26 - B		101,6		
	D.T	49,3	49,6	49,45
	D.R	43,1	41,8	42,45
27 - A		101,6		
	D.T	48,8	49,8	49,3
	D.R	42,9	43	42,95
27 - B		101,7		
	D.T	50	49,3	49,65
	D.R	43	42	42,5

**MEZCLA CON BETÓN BC 35/50**

<b>Probeta</b>		<b>H1 (mm)</b>	<b>H2 (mm)</b>	<b>Hm (mm)</b>
<b>28 - A</b>		101,3		
	D.T	48,6	48,9	48,75
	D.R	42,8	42,5	42,65
<b>28 - B</b>		101,6		
	D.T	49,8	49,7	49,75
	D.R	44,4	43,4	43,9
<b>29 - A</b>		101,7		
	D.T	49,6	49,7	49,65
	D.R	42,8	42,8	42,8
<b>29 - B</b>		101,7		
	D.T	48,8	48,8	48,8
	D.R	43,3	43	43,15
<b>30 - A</b>		101,7		
	D.T	49,5	48,6	49,05
	D.R	42,7	43,1	42,9
<b>30 - B</b>		101,7		
	D.T	48,9	50	49,45
	D.R	42,9	42,4	42,65
<b>31 - A</b>		101,7		
	D.T	49,5	50	49,75
	D.R	43,2	43,2	43,2
<b>31 - B</b>		101,6		
	D.T	49	48,5	48,75
	D.R	41,7	43,2	42,45
<b>32 - A</b>		101,9		
	D.T	49,1	50,1	49,6
	D.R	42	43,2	42,6

<b>32 - B</b>		101,6		
	D.T	49,3	48,5	48,9
	D.R	42,5	42,9	42,7
<b>33 - A</b>		101,6		
	D.T	49,3	50,3	49,8
	D.R	43,5	42,5	43
<b>33 - B</b>		101,5		
	D.T	49	48,4	48,7
	D.R	43,2	42,5	42,85
<b>34 - A</b>		101,2		
	D.T	49,5	49,5	49,5
	D.R	43,5	43,4	43,45
<b>34 - B</b>		101,7		
	D.T	49,1	49,3	49,2
	D.R	42,2	43,5	42,85
<b>35 - A</b>		101,7		
	D.T	49,6	49,9	49,75
	D.R	44	42,6	43,3
<b>35 - B</b>		101,6		
	D.T	48,9	48,5	48,7
	D.R	42,2	42,9	42,55
<b>36 - A</b>		101,8		
	D.T	49,6	50,2	49,9
	D.R	42,7	43,5	43,1
<b>36 - B</b>		101,7		
	D.T	48,9	48,3	48,6
	D.R	41,6	42,9	42,25



## **ANEJO 2: ENSAYO FÉNIX**

### ***DENSIDADES Y CONTENIDO DE HUECOS***

En el presente anejo se presentan los valores de las densidades y huecos de cada una de las probetas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB.

### MEZCLA CON BETÚN B 50/70 (2)

		Betún B 50/70 (2)								
REFERENCIA		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densidad		2,376	2,380	2,378	2,384	2,378	2,381	2,369	2,379	2,369
%PM	Betún (b)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95	95	95	95	95	95	95	95
D	Aparente (f)	2,376	2,380	2,378	2,384	2,378	2,381	2,369	2,379	2,369
	P.e.áridos	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,211	95,372	95,292	95,532	95,292	95,412	94,931	95,332	94,931
%H	Mezcla (100-z)	4,8	4,6	4,7	4,5	4,7	4,6	5,1	4,7	5,1
Promedio Densidad (g/cm3)										2,377
Promedio % huecos										4,7
Desviación típica										0,00511
Coeficiente de variación										0,215

### MEZCLA CON BETÚN B 50/70 (1)

		Betún B 50/70 (1)								
REFERENCIA		10	11	12	13	14	15	16	17	18
Densidad		2,371	2,380	2,374	2,377	2,382	2,391	2,389	2,382	2,375
%PM	Betún (b)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95	95	95	95	95	95	95	95
D	Aparente (f)	2,371	2,380	2,374	2,377	2,382	2,391	2,389	2,382	2,375
	P.e.áridos	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,011	95,372	95,131	95,252	95,452	95,813	95,732	95,452	95,171
%H	Mezcla (100-z)	5,0	4,6	4,9	4,7	4,5	4,2	4,3	4,5	4,8
Promedio Densidad (g/cm3)										2,380
Promedio % huecos										4,6
Desviación típica										0,00672
Coeficiente de variación										0,2822



## MEZCLA CON BETÓN BM3c

		Betún BM3c								
REFERENCIA		19	20	21	22	23	24	25	26	27
Densidad		2,388	2,386	2,394	2,392	2,389	2,391	2,383	2,387	2,392
%PM	Betún (b)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95	95	95	95	95	95	95	95
D	Aparente (f)	2,388	2,386	2,394	2,392	2,389	2,391	2,383	2,387	2,392
	P.e.áridos	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,692	95,612	95,933	95,853	95,732	95,813	95,492	95,652	95,853
%H	Mezcla (100-z)	4,3	4,4	4,1	4,1	4,3	4,2	4,5	4,3	4,1
Promedio Densidad (g/cm3)										2,3891
Promedio % huecos										4,3
Desviación típica										0,00348
Coeficiente de variación										0,1457

		Betún BC 35/50								
REFERENCIA		28	29	30	31	32	33	34	35	36
Densidad		2,374	2,374	2,375	2,374	2,374	2,375	2,378	2,384	2,377
%PM	Betún (b)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95	95	95	95	95	95	95	95
D	Aparente (f)	2,374	2,374	2,375	2,374	2,374	2,375	2,378	2,384	2,377
	P.e.áridos	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,131	95,131	95,171	95,131	95,131	95,171	95,292	95,532	95,252
%H	Mezcla (100-z)	4,9	4,9	4,8	4,9	4,9	4,8	4,7	4,5	4,7
Promedio Densidad (g/cm3)										2,376
Promedio % huecos										4,8
Desviación típica										0,00330
Coeficiente de variación										0,139

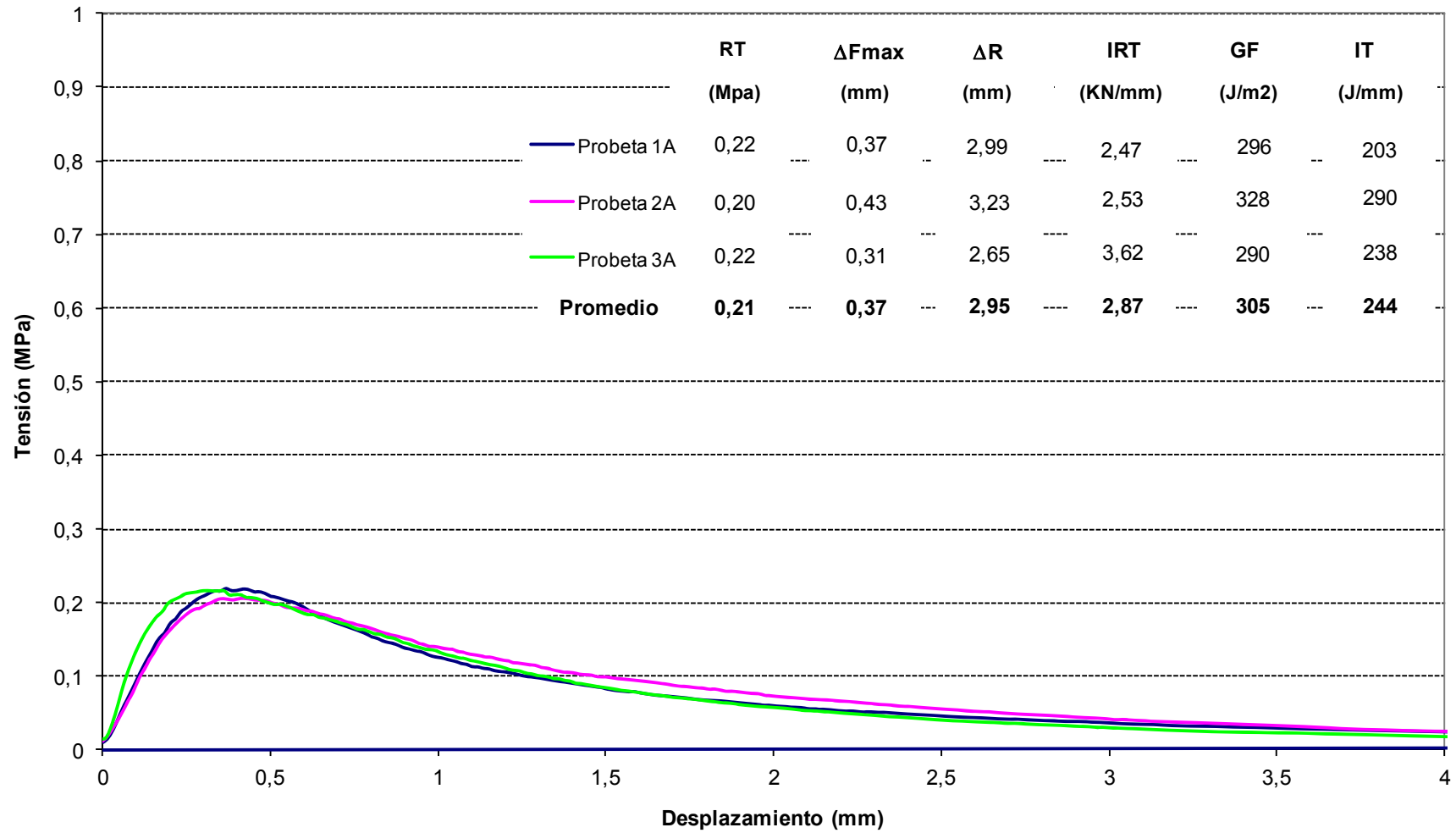


### **ANEJO 3: ENSAYO FÉNIX**

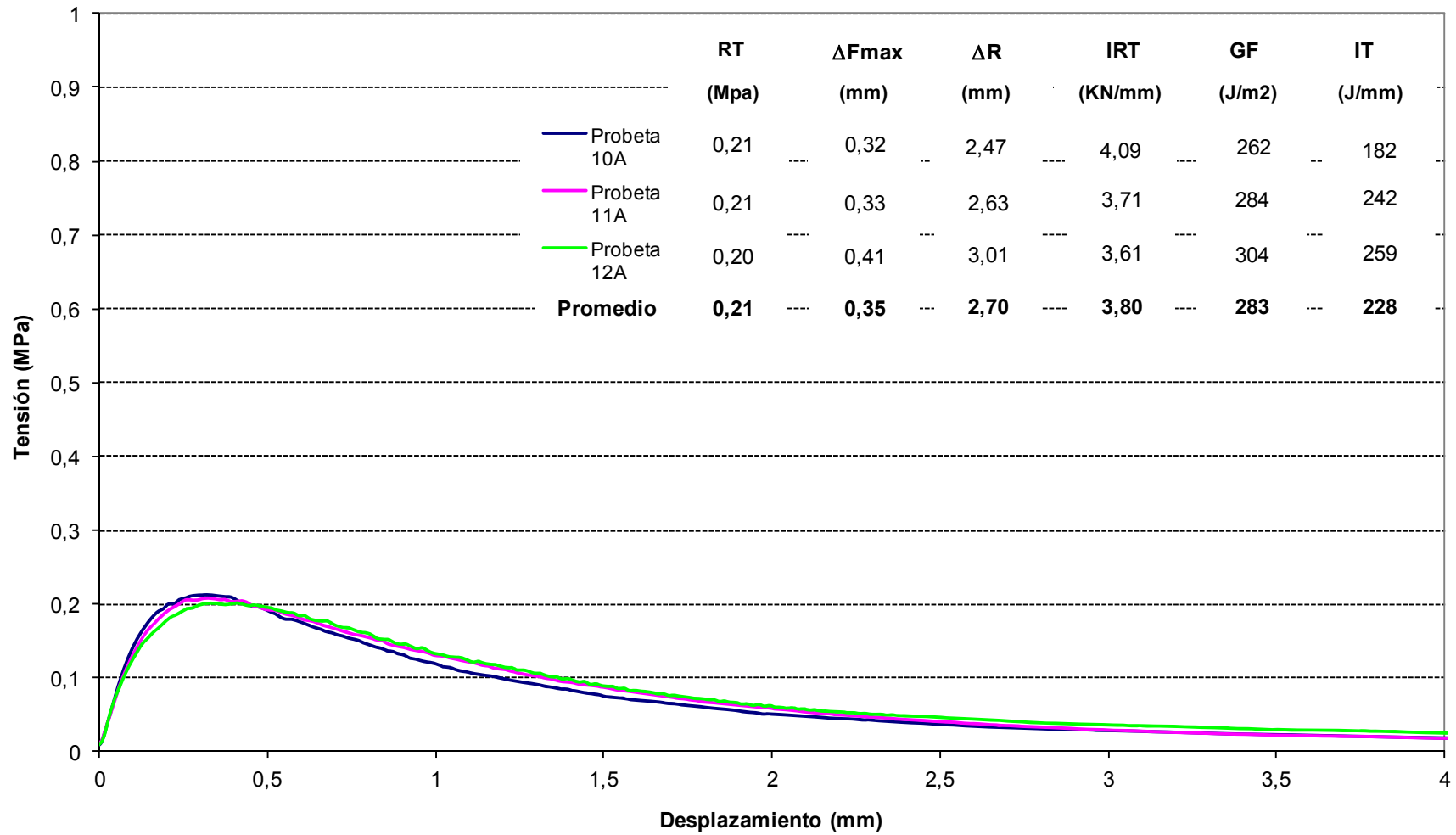
#### ***CURVAS TENSIÓN - DESPLAZAMIENTO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE ENSAYO Y LA VELOCIDAD DE APLICACIÓN DE CARGA***

En el presente anejo se presentan los resultados del ensayo Fénix de cada una de las probetas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB. Las probetas en las que no se especifica la velocidad de aplicación de carga, se considerará como  $v = 1$  mm/min.

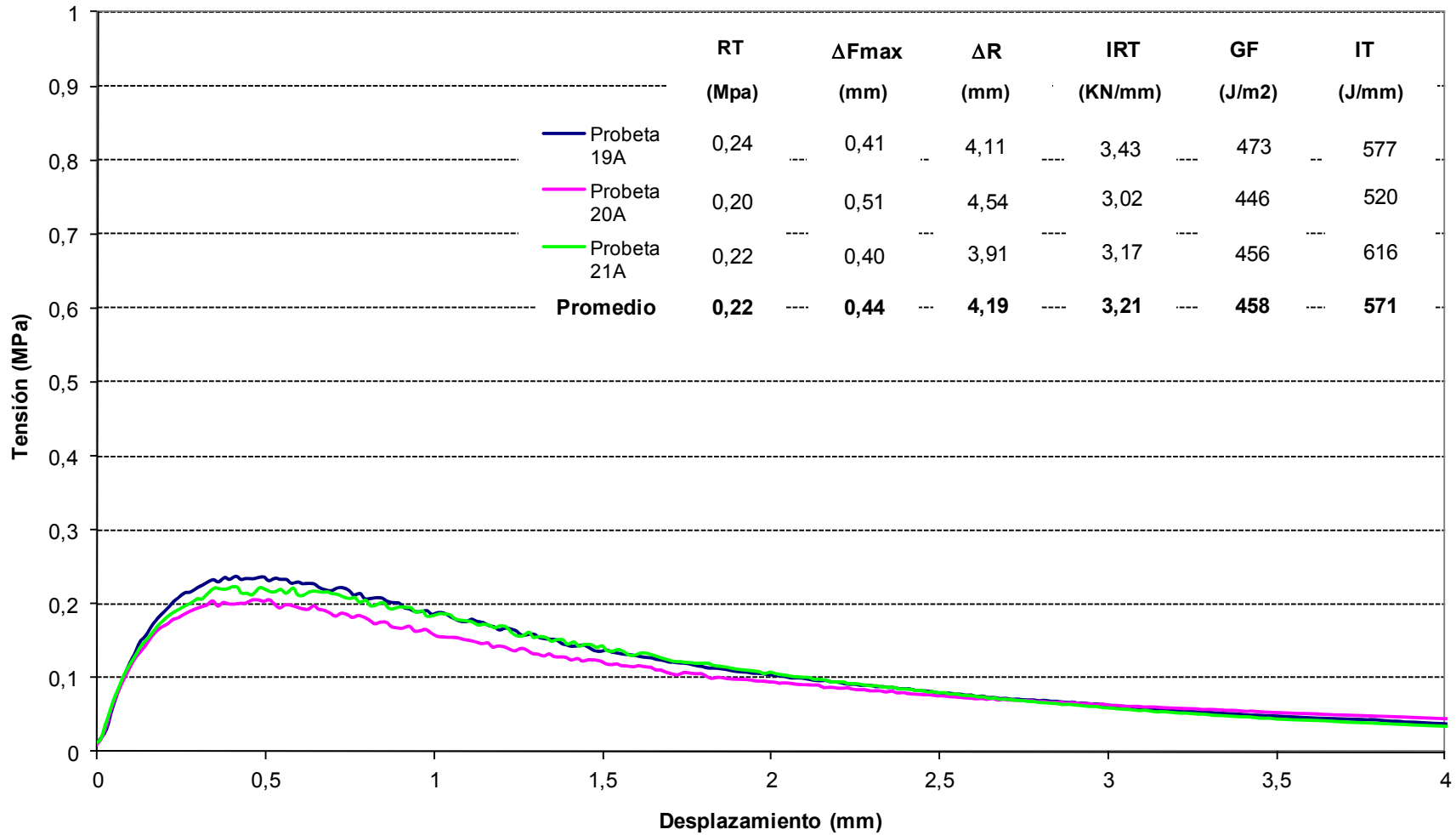
## Ensayo Fénix a 20°C - Betún B 50/70 (2)



## Ensayo Fénix a 20°C - Betún B 50/70 (1)

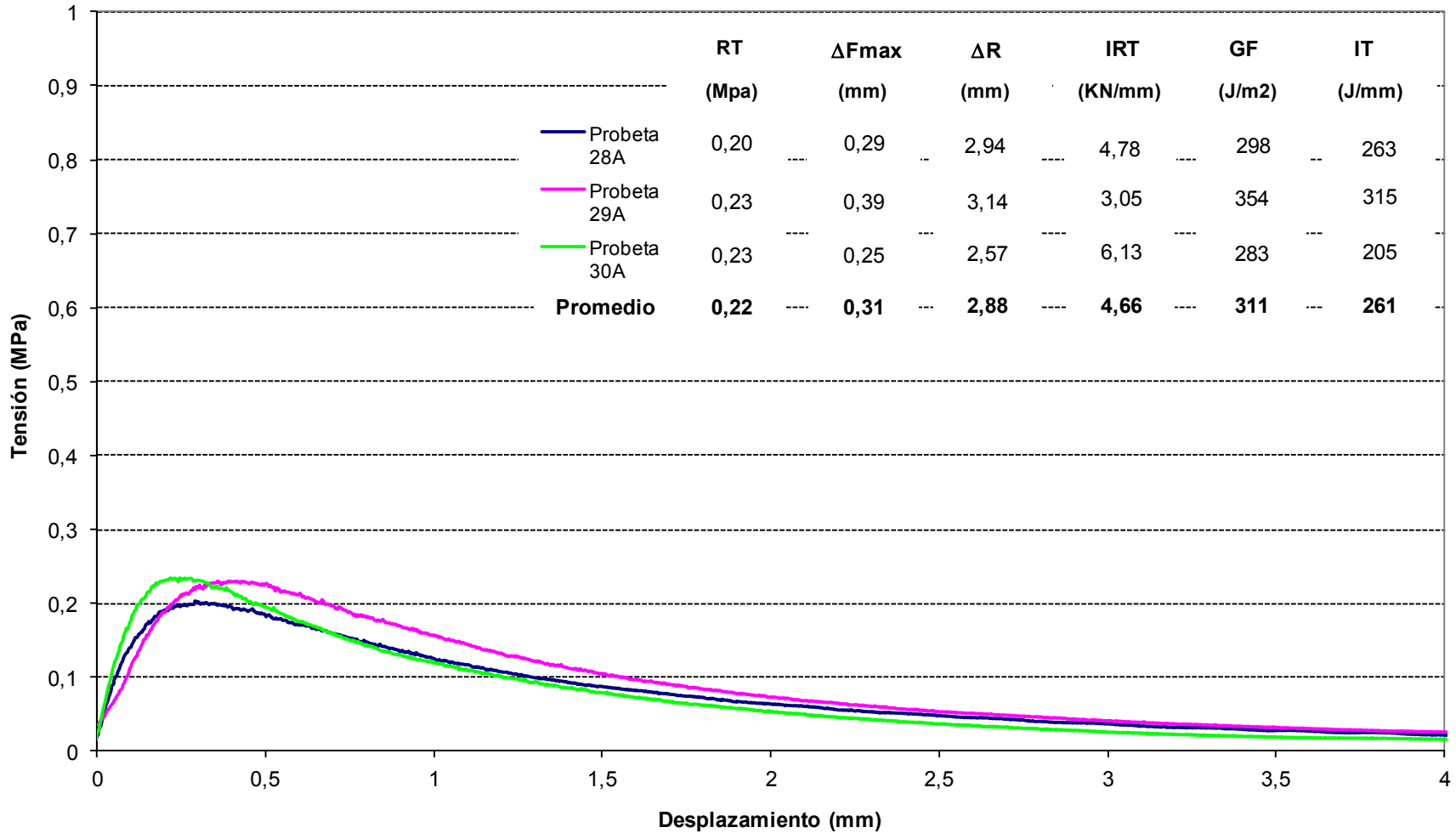


Ensayo Fénix a 20°C - Betún BM3c

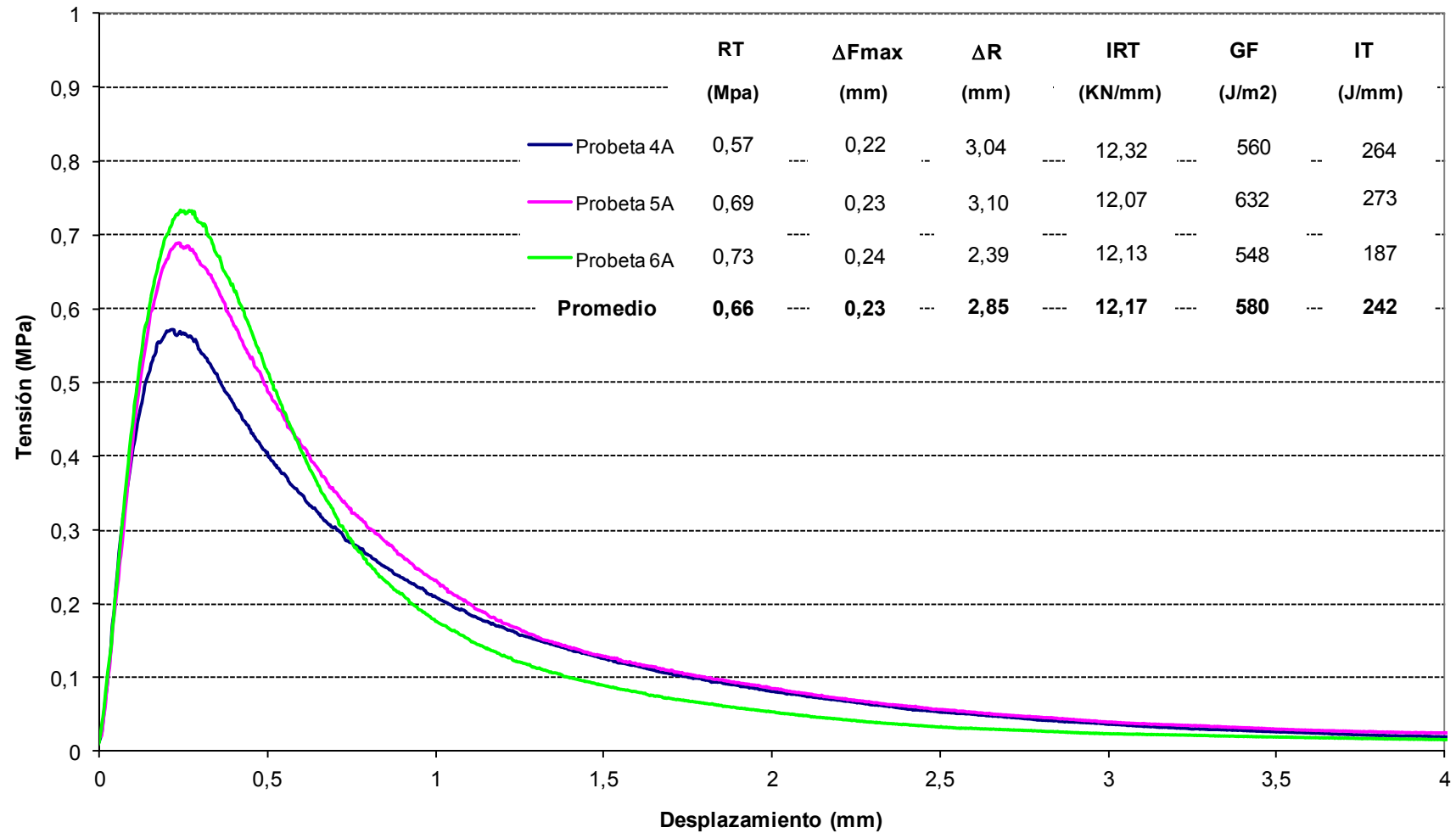




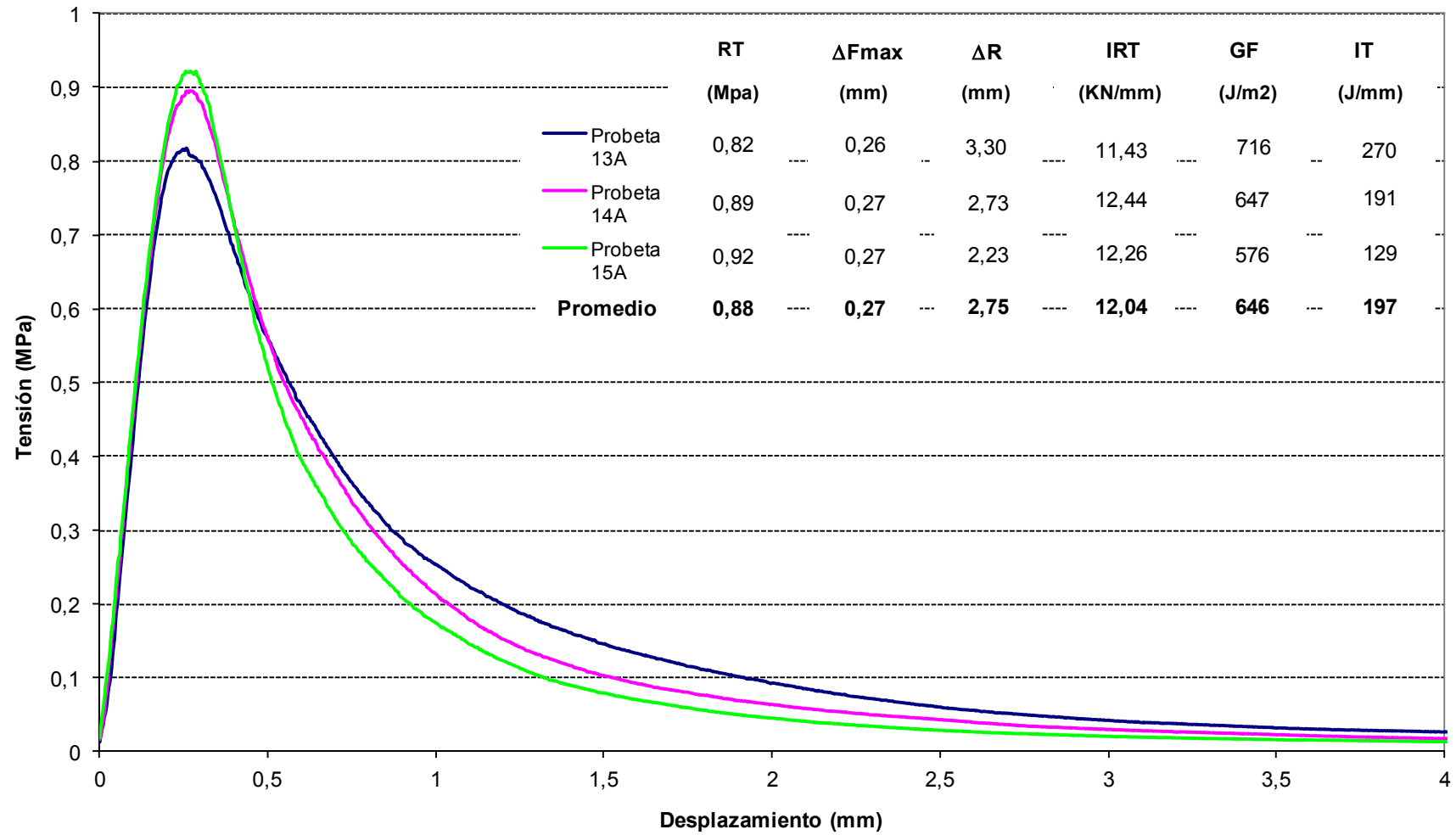
Ensayo Fénix a 20°C - Betún BC 35/50



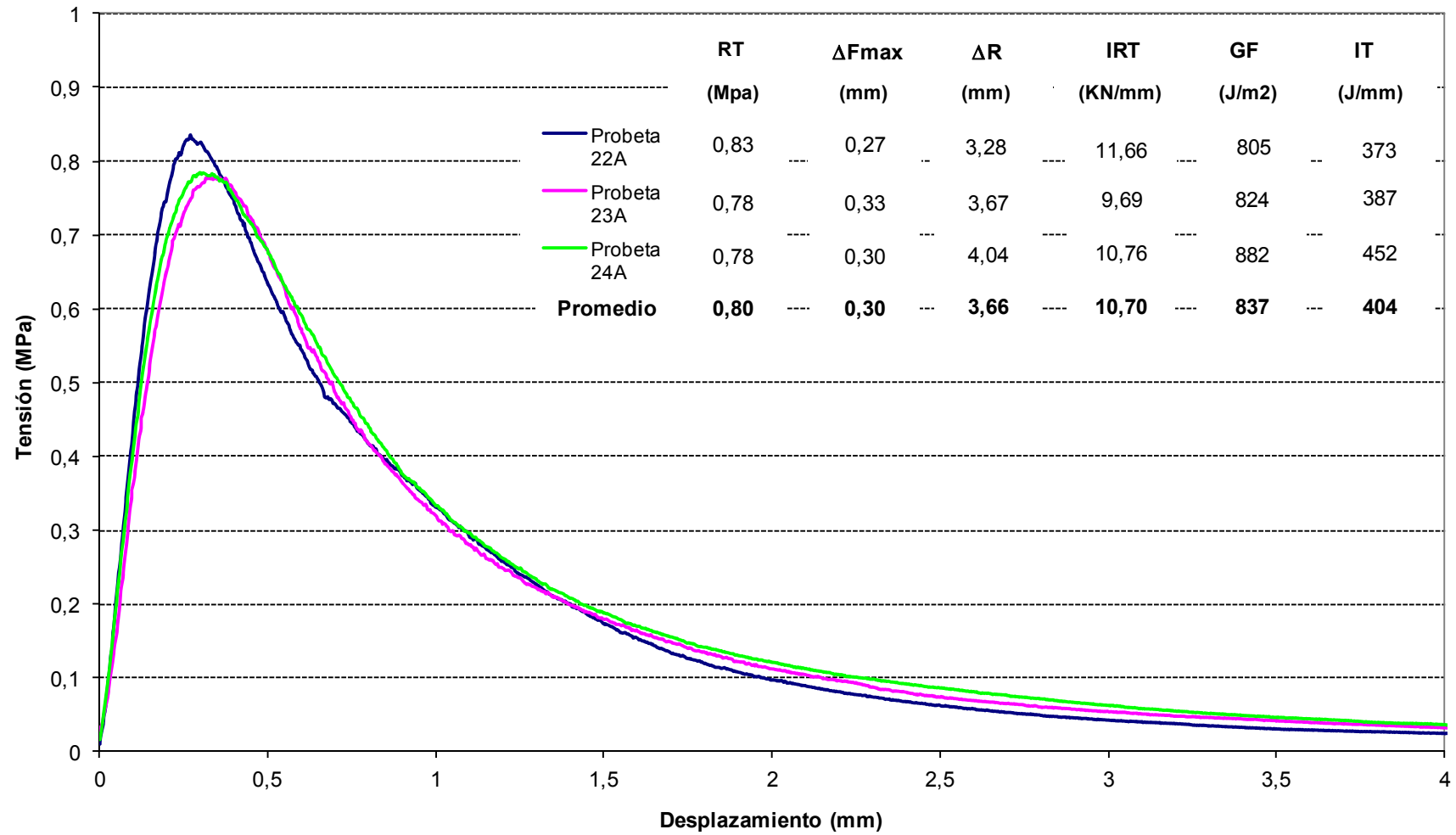
## Ensayo Fénix a 5°C - Betún B 50/70 (2)



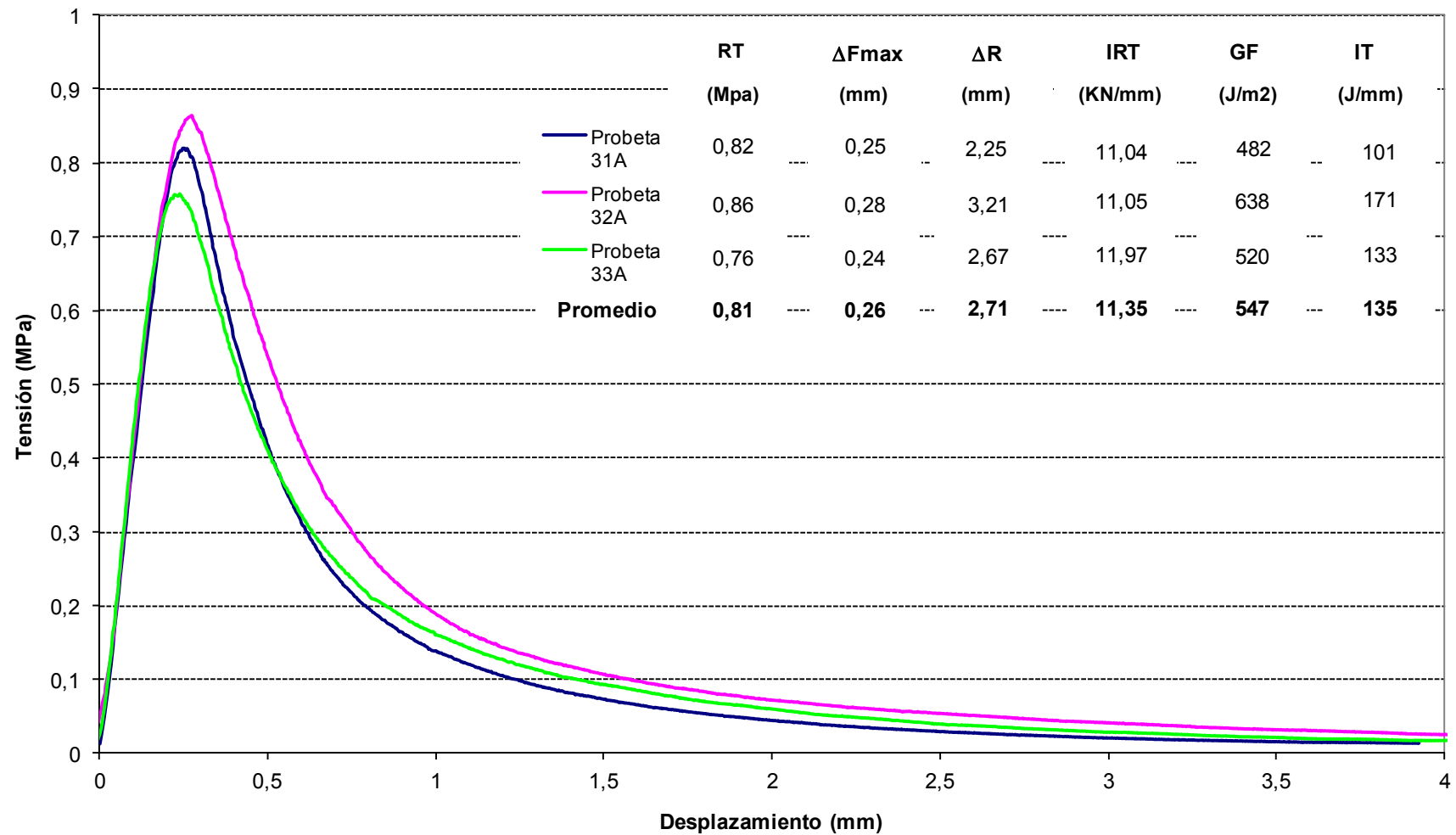
## Ensayo Fénix a 5°C - Betún B 50/70 (1)



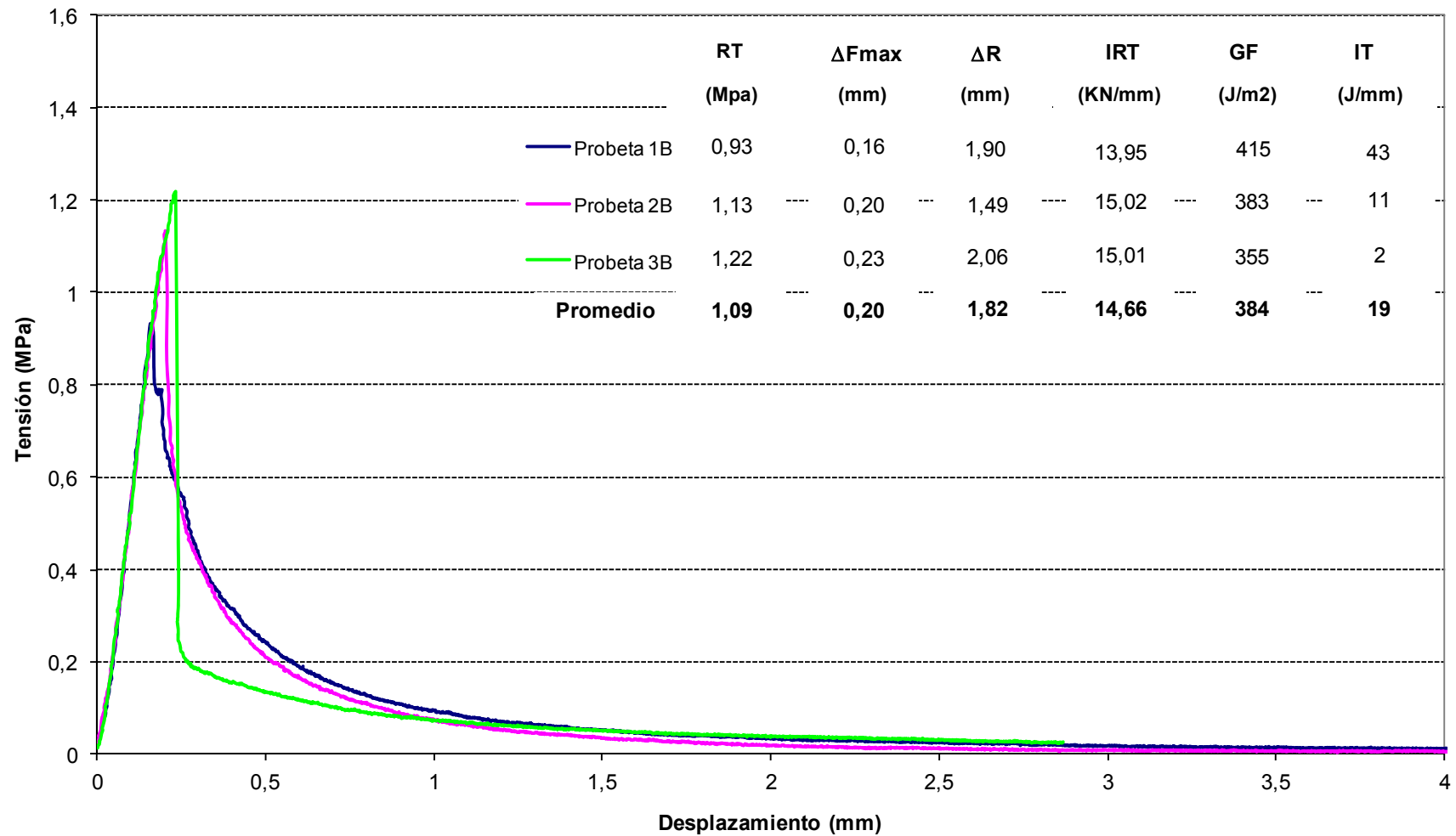
## Ensayo Fénix a 5°C - Betún BM3c



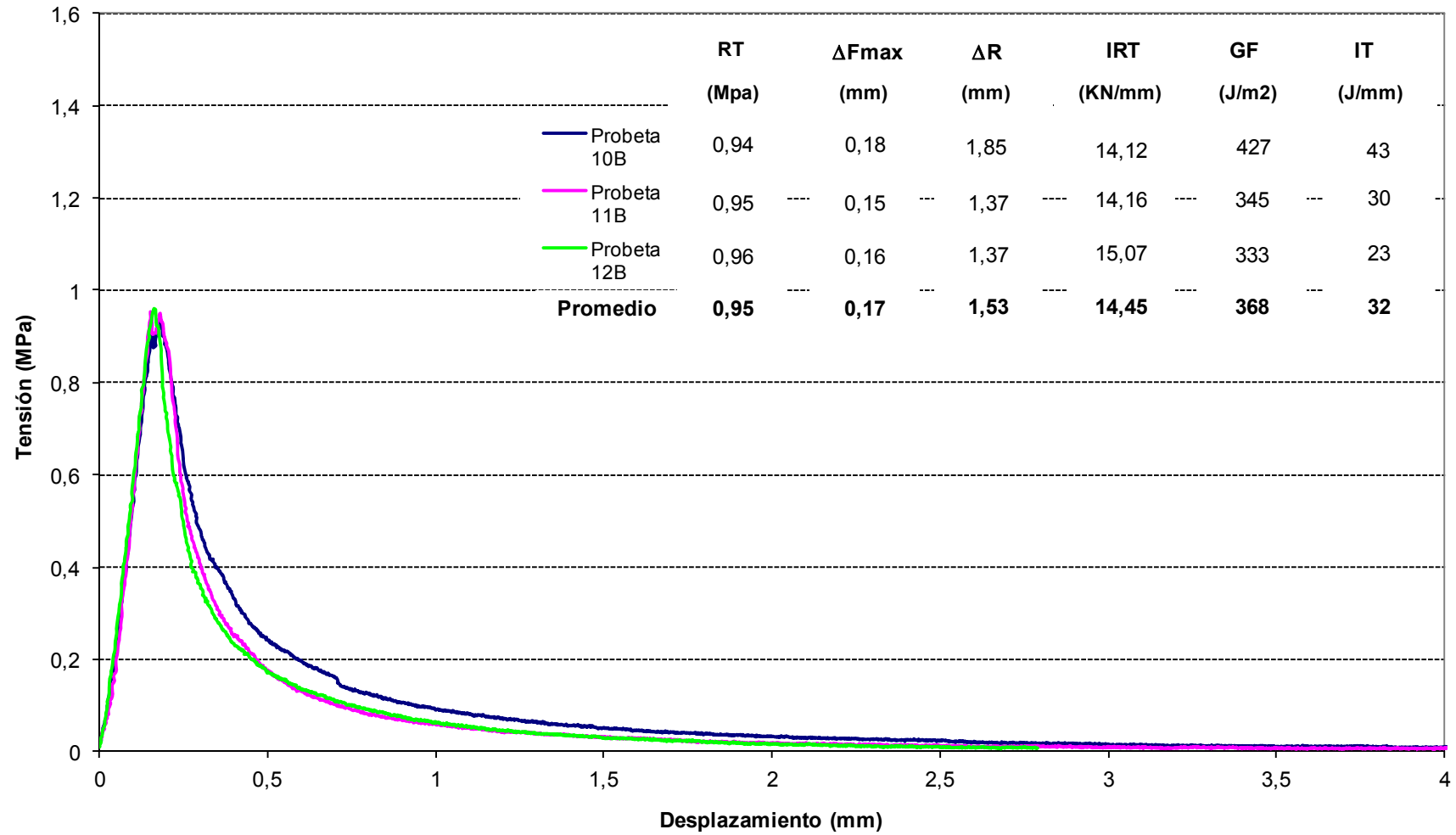
## Ensayo Fénix a 5°C - Betún BC 35/50



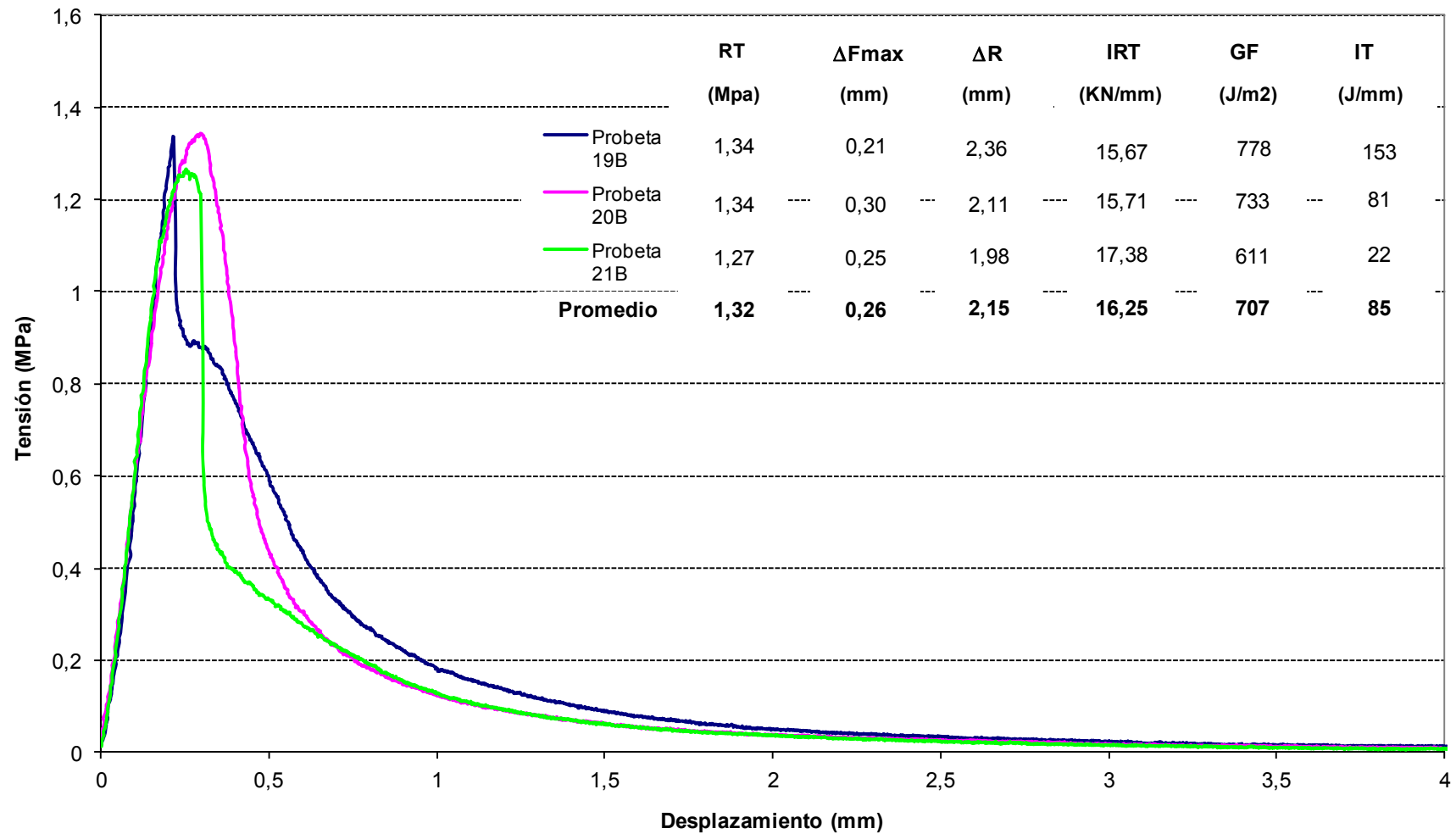
## Ensayo Fénix a -5°C - Betún B 50/70 (2)



## Ensayo Fénix a -5°C - Betún B 50/70 (1)

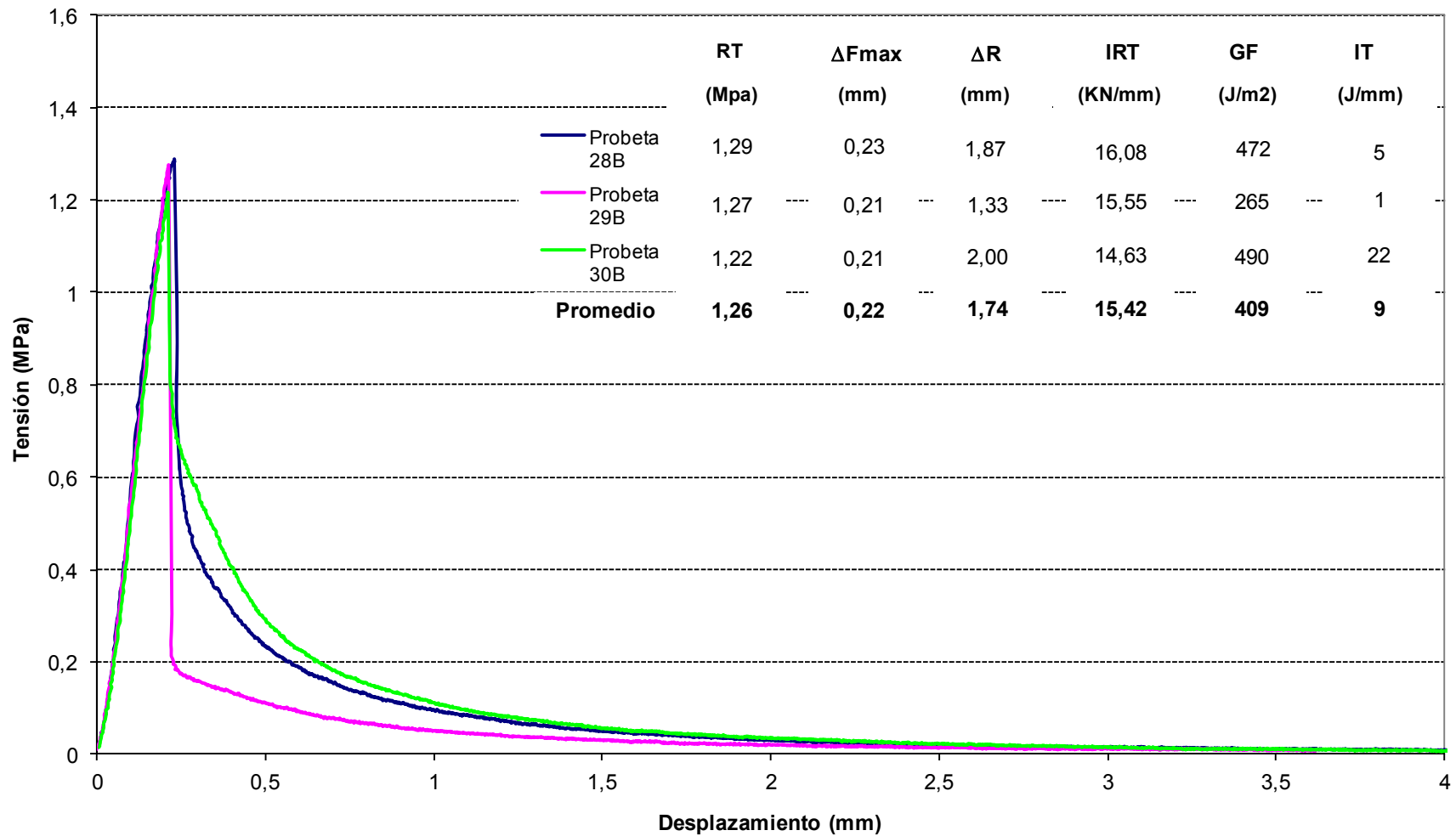


## Ensayo Fénix a -5°C - Betún BM3c

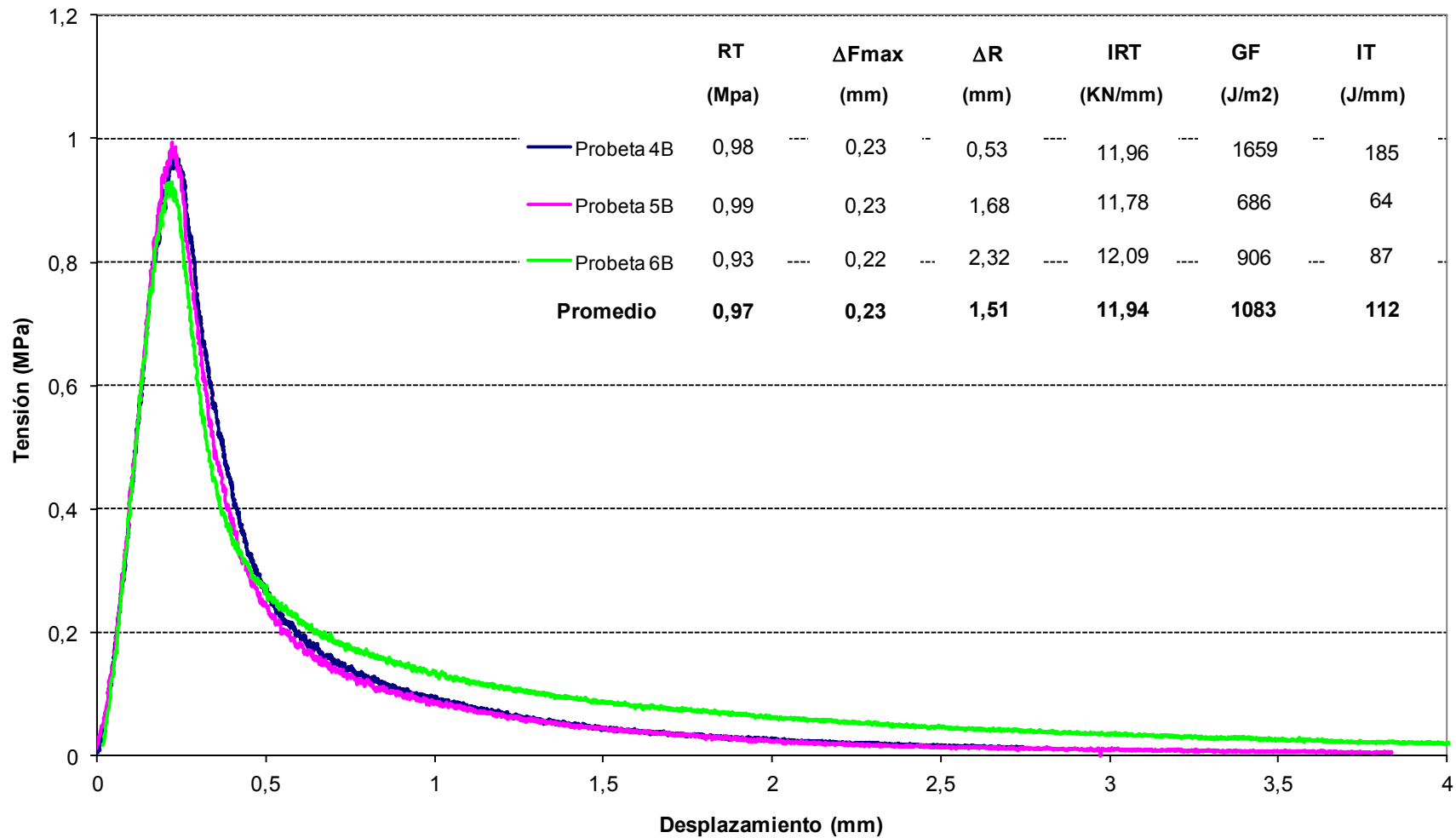




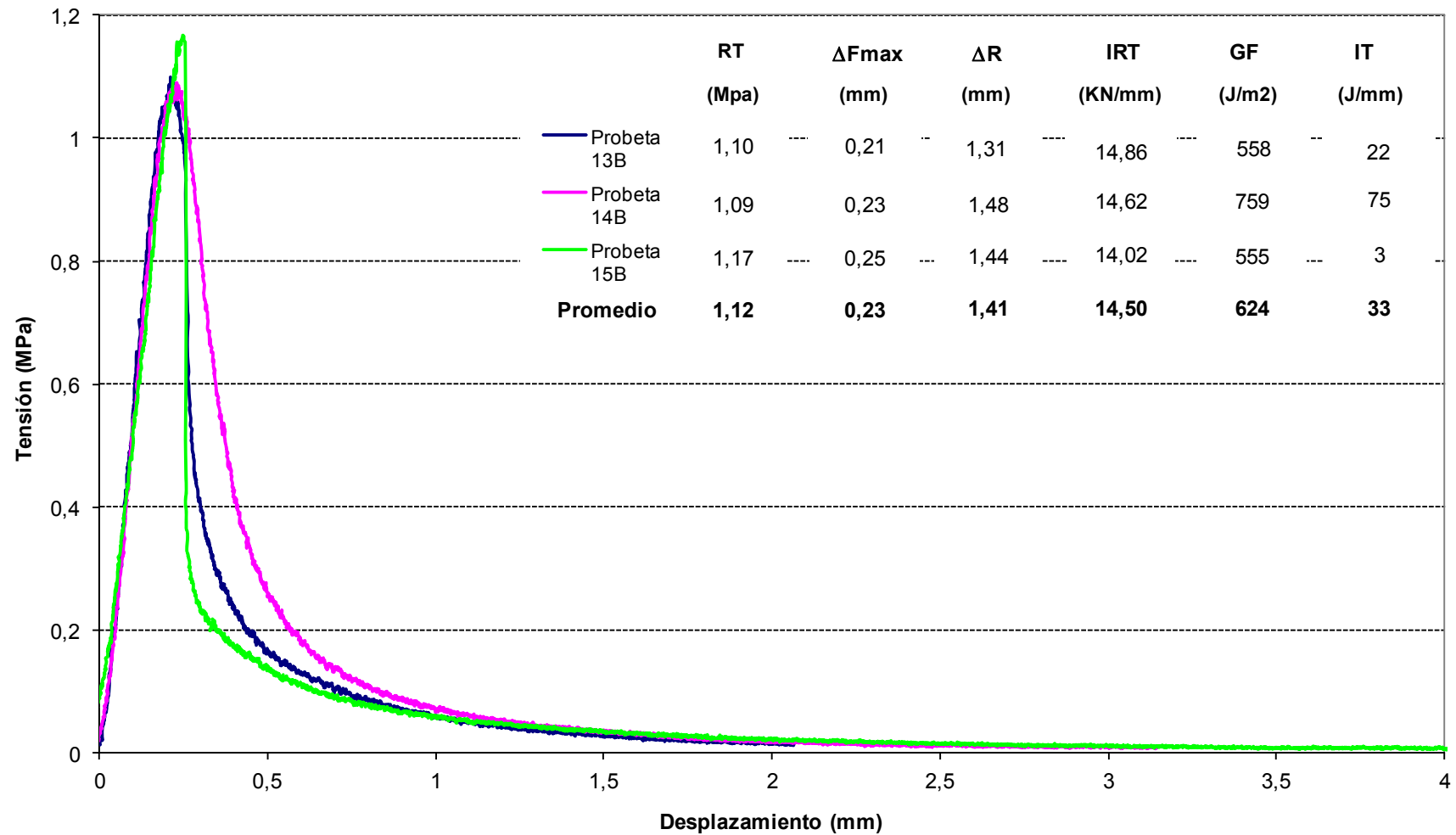
Ensayo Fénix a -5°C - Betún BC 35/50



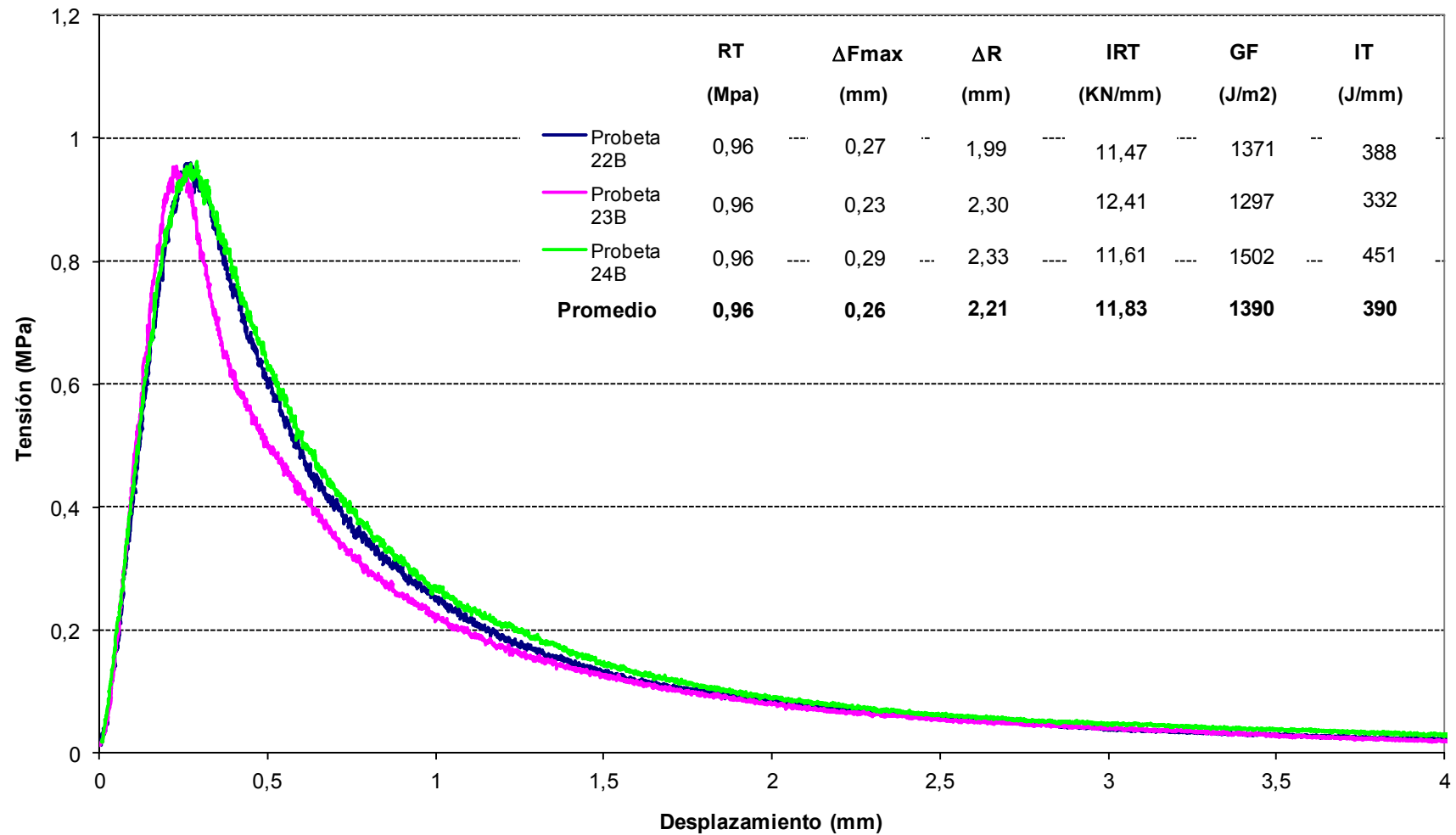
Ensayo Fénix a -5°C - Betún B 50/70 (2) (v = 0,1 mm/min)



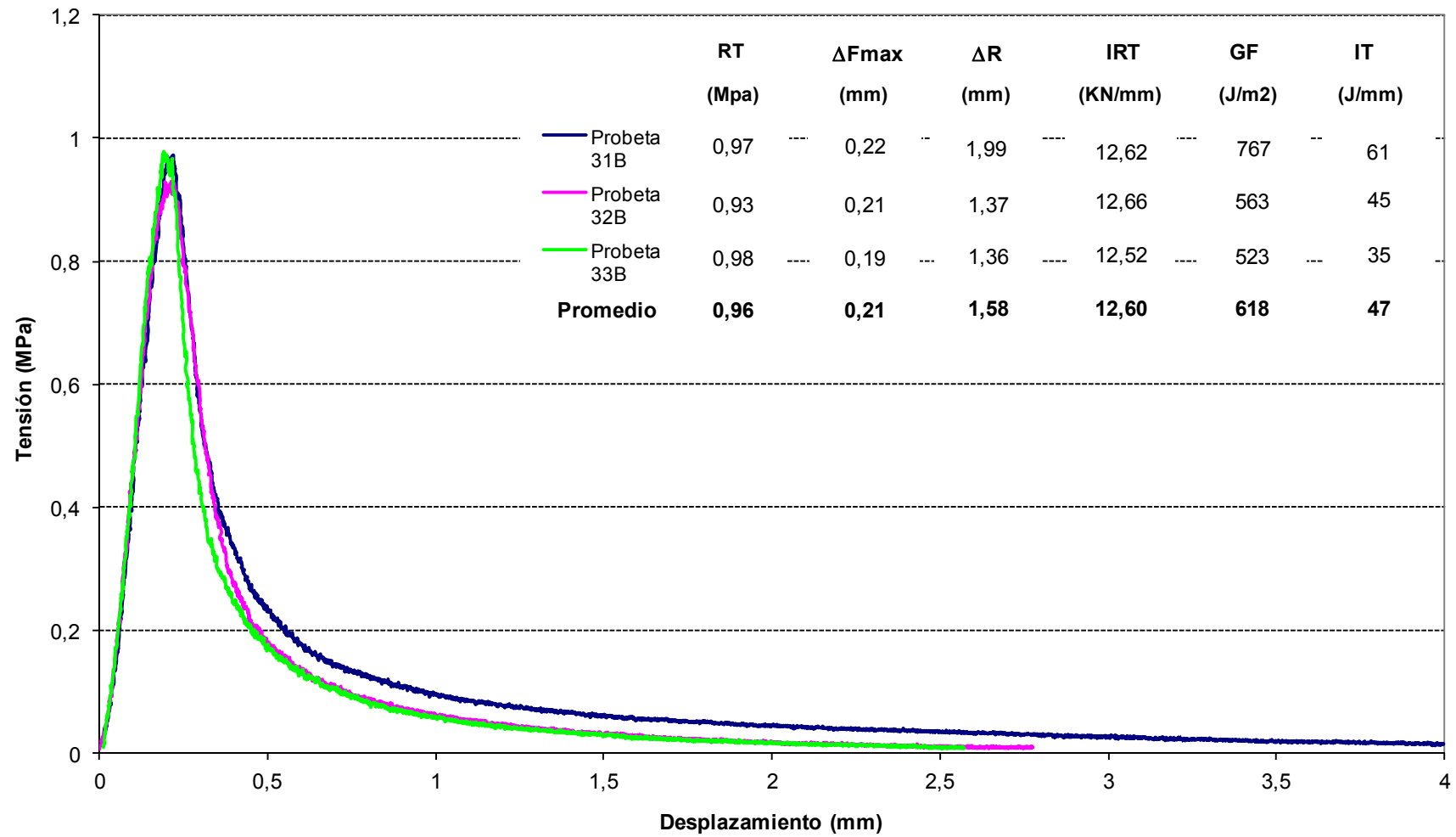
## Ensayo Fénix a -5°C - Betún B 50/70 (1) ( $v = 0,1 \text{ mm/min}$ )



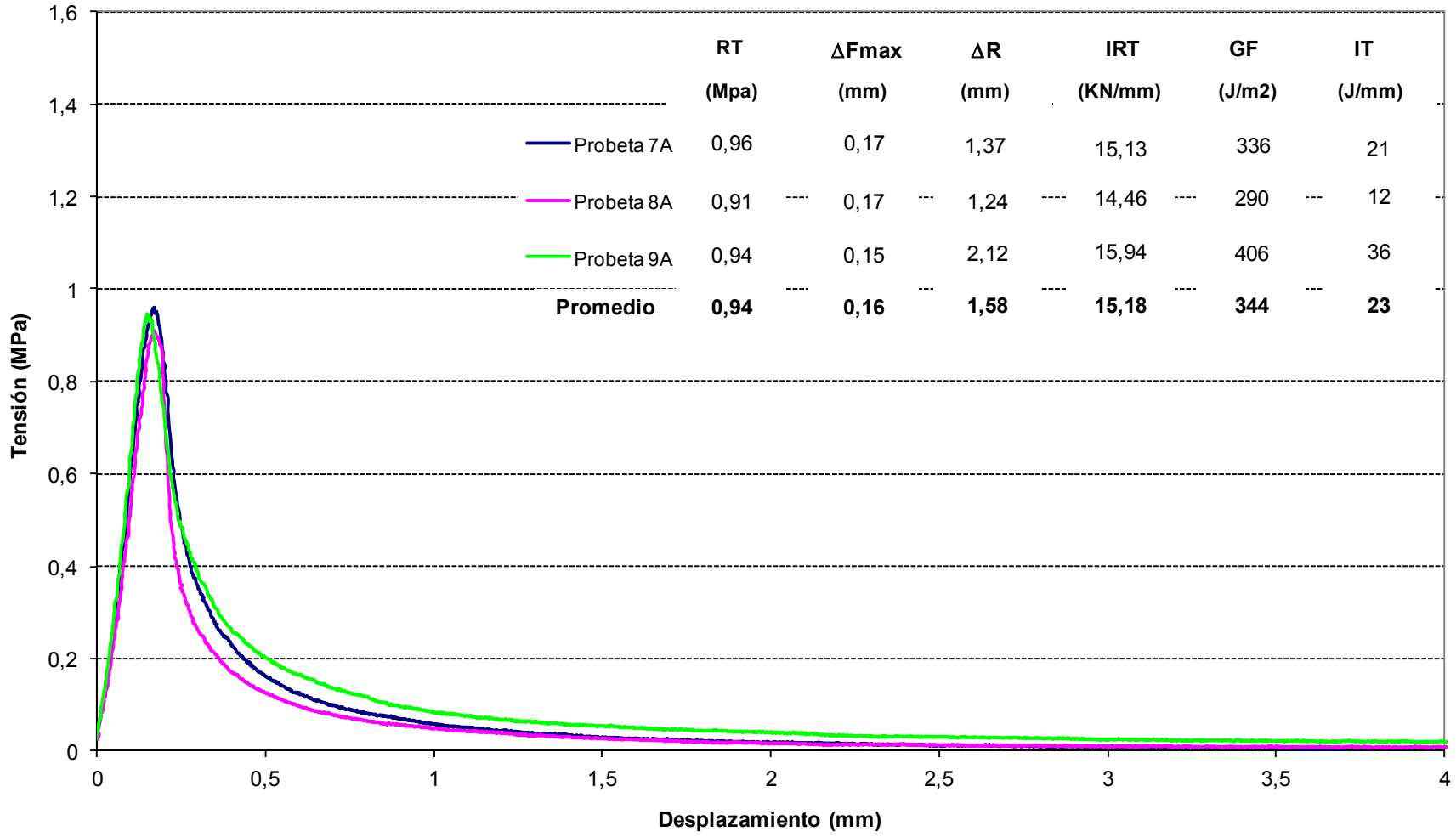
## Ensayo Fénix a -5°C - Betún BM3c (v = 0,1 mm/min)



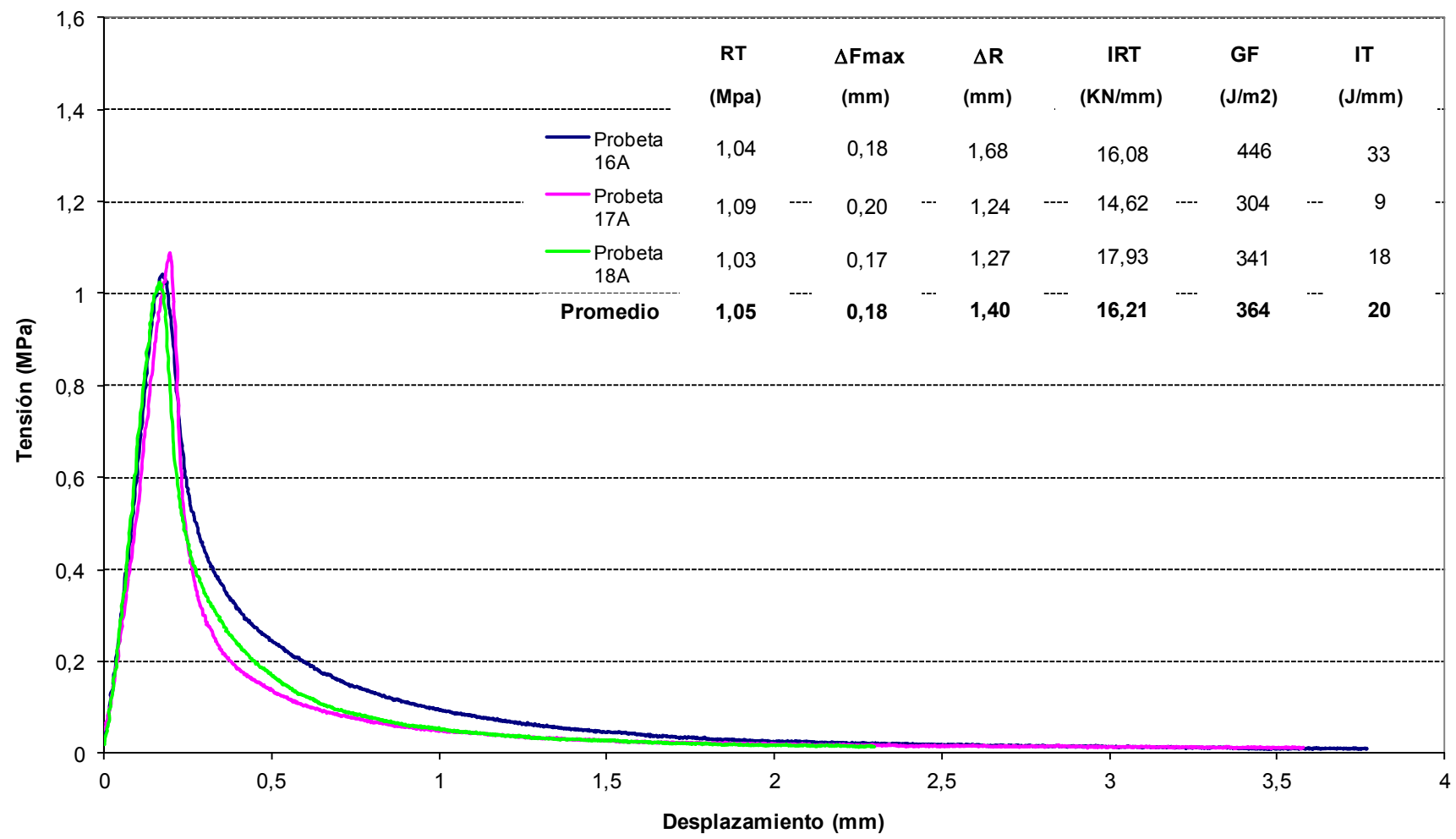
## Ensayo Fénix a -5°C - Betún BC 35/50 ( $v = 0,1 \text{ mm/min}$ )



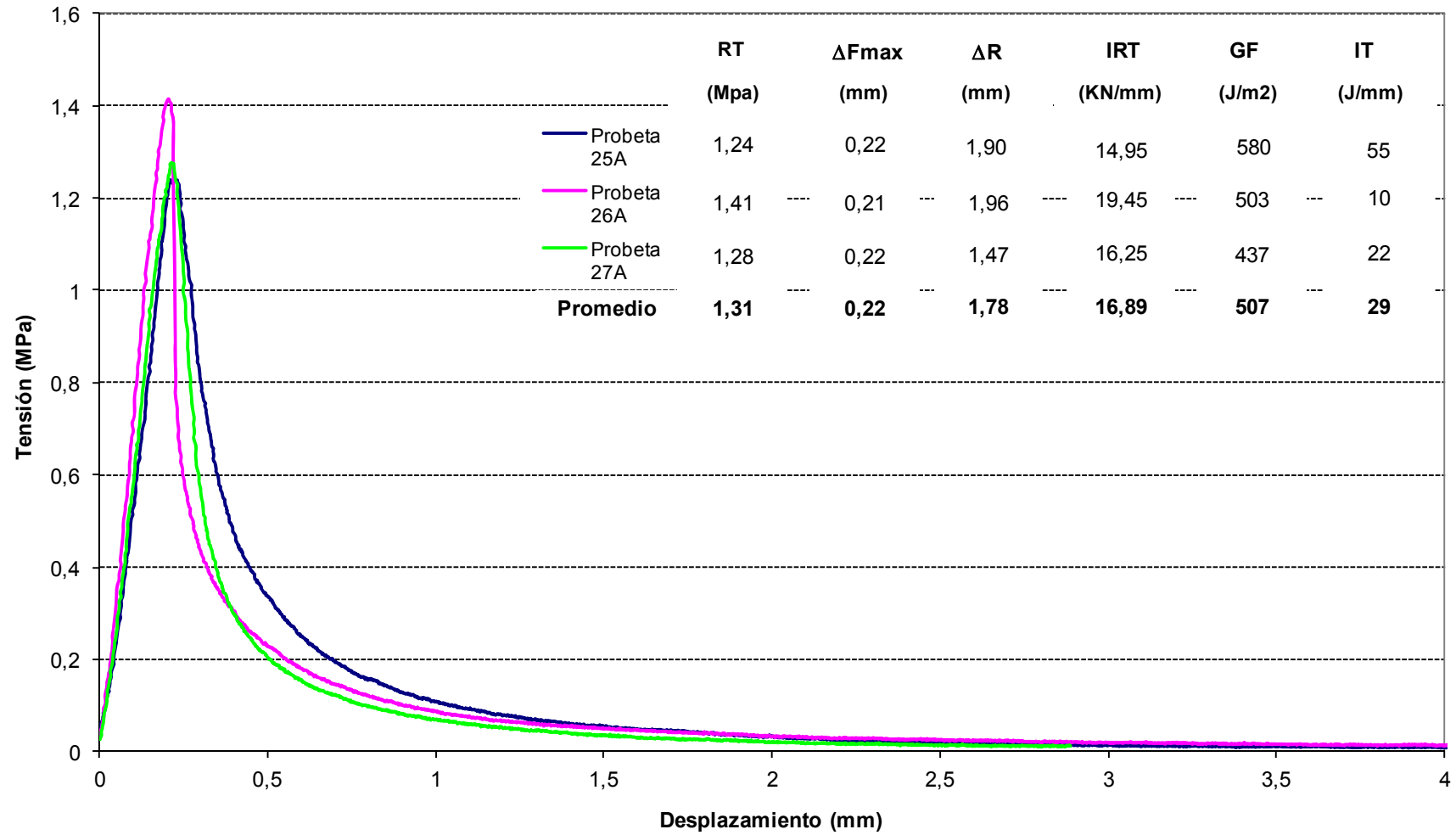
Ensayo Fénix a -15°C - Betún B 50/70 (2)



Ensayo Fénix a -15°C - Betún B 50/70 (1)

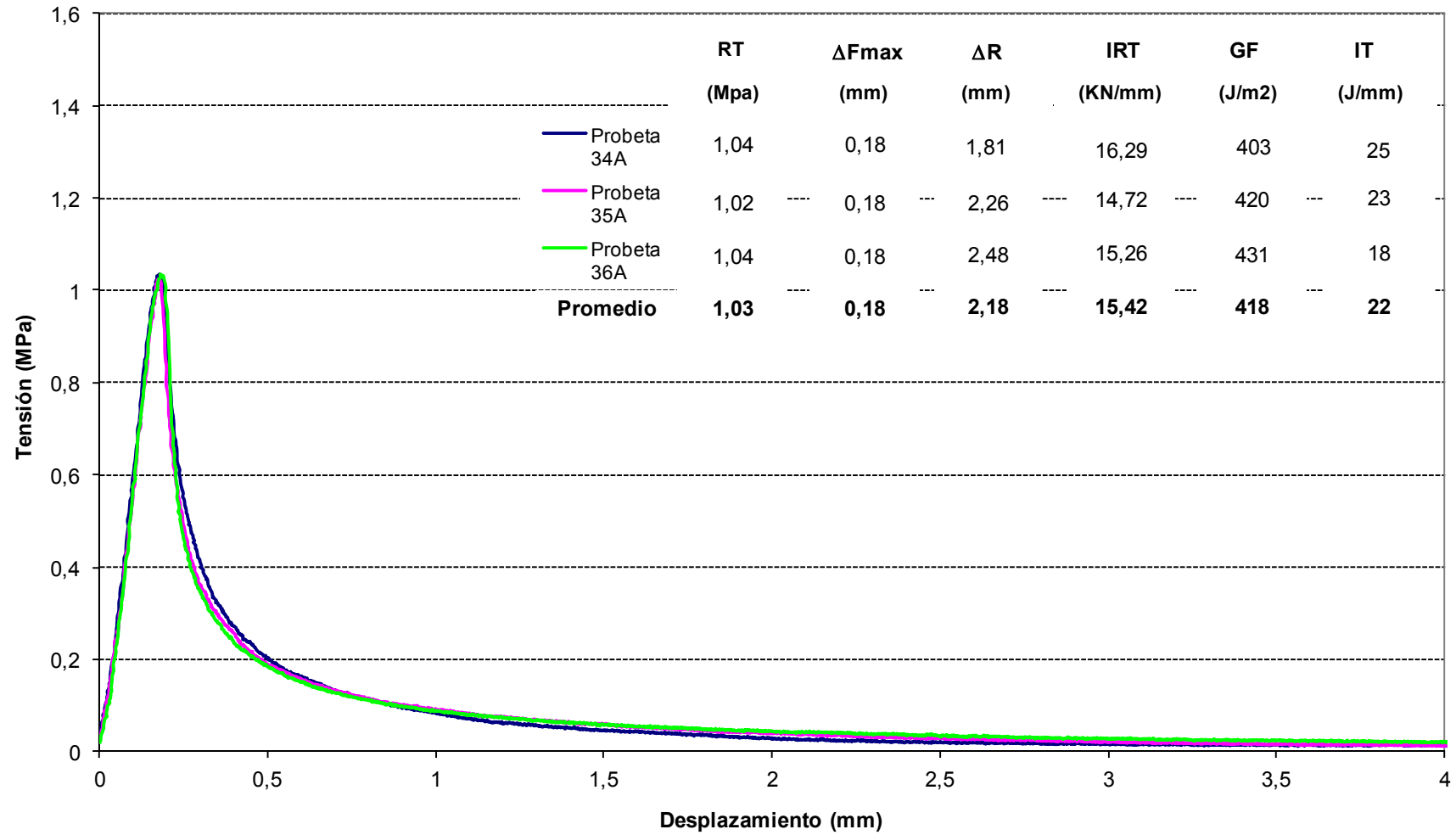


## Ensayo Fénix a -15°C - Betún BM3c





## Ensayo Fénix a -15°C - Betún BC 35/50





## **ANEJO 4: ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS**

### ***DATOS EXPERIMENTALES***

En el presente anejo se presentan los valores de las alturas, pesos y densidades de cada una de las placas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB. También se presentan los valores de las alturas, pesos y densidades de cada una de las probetas correspondientes a cada placa. Cada placa se ha dividido en cinco probetas.

**MEZCLA CON BETÓN B 50/70 (2)**

**PROYECTO MADISON**

Placas	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )
1	49,9	50,7	50,4	50,3	14,1	8,5	14,2	2,5	2,437
	49,2	49,9		49,6					
	49,3	49,3	49,9	49,5					
	49,2	49,0		49,1					
2	49,2	49,8	49,2	49,4	14,1	8,3	14,2	2,4	2,437
	48,5	48,5		48,5					
	48,8	49,0	48,9	48,9					
	48,8	48,7		48,8					

**MEZCLA CON BETÓN B 50/70 (1)**

**PROYECTO MADISON**

Placas	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )
1	49,9	49,7	49,4	49,7	14,1	8,2	14,1	2,4	2,388
	48,9	48,8							
	50,8	49,6	49,3						
	49,5	49,1							
2	49,0	49,4	50,0		14,1	8,3	14,2	2,4	2,388
	48,9	48,6							
	48,6	48,6	48,9						
	48,8	48,8							

**MEZCLA CON BETÓN BM3c**

**PROYECTO MADISON**

Placas	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )
1	49,3	49,2	49,1	49,2	14,1	8,3	14,1	2,4	2,396
	48,6	49,3		49,0					
	48,5	48,3	48,6	48,5					
	48,5	49,3		48,9					
2	49,3	49,0	49,1	49,1	14,1	8,2	14,1	2,4	2,396
	48,7	49,1		48,9					
	49,5	49,7	51,2	50,1					
	49,5	49,7		49,6					

**MEZCLA CON BETÓN BC 35/50**

**PROYECTO MADISON**

Placas	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )
1	49,8	49,5	49,5	49,6	14,1	8,2	14,1	2,4	2,375
	49,0	48,7		48,9					
	48,6	48,9	48,8	48,8					
	48,8	49,2		49,0					
2	50,3	49,9	49,9	50,0	14,1	8,2	14,2	2,4	2,375
	49,6	50,1		49,9					
	49,1	49,2	49,1	49,1					
	49,5	49,1		49,3					

**MEZCLA CON BETÓN B 50/70 (2)**

<b>Probeta</b>	<b>H1 (mm)</b>	<b>H2 (mm)</b>	<b>H3 (mm)</b>	<b>Hm (mm)</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>Peso sumergido (g)</b>	<b>P.S.S.S (g)</b>	<b>Densidad (g/cm3)</b>	<b>Densidad Media (g/cm3)</b>
<b>1-1</b>									
<b>ALTO</b>	49,5	49,2	49,4	49,4	2359,1	1376,0	2363,2	2,390	
<b>ANCHO</b>	51,1	50,7	50,7	50,8					
<b>1-2</b>									
<b>ALTO</b>	49,2	48,8	49,4	49,1	2344,9	1365,1	2349,6	2,382	
<b>ANCHO</b>	50,4	50,6	50,7	50,6					
<b>1-3</b>									
<b>ALTO</b>	48,7	49,0	49,2	49,0	2337,7	1362,6	2343,6	2,383	2,386
<b>ANCHO</b>	50,7	50,6	50,6	50,6					
<b>1-4</b>									
<b>ALTO</b>	48,8	49,4	49,5	49,2	2358,0	1375,0	2363,9	2,384	
<b>ANCHO</b>	50,9	50,8	50,7	50,8					
<b>1-5</b>									
<b>ALTO</b>	48,8	49,4	49,5	49,2	2371,2	1384,8	2376,1	2,392	
<b>ANCHO</b>	50,9	50,7	50,9	50,8					
<b>2-1</b>									
<b>ALTO</b>	48,8	48,7	48,6	48,7	2359,9	1382,7	2365,7	2,401	
<b>ANCHO</b>	51,0	50,9	50,9	50,9					
<b>2-2</b>									
<b>ALTO</b>	48,9	49,3	48,5	48,9	2351,7	1373,4	2359,8	2,384	2,402
<b>ANCHO</b>	51,1	50,9	50,5	50,8					
<b>2-3</b>									
<b>ALTO</b>	48,6	48,5	48,6	48,6	2330,5	1364,4	2334,3	2,403	
<b>ANCHO</b>	50,7	50,3	50,6	50,5					

<b>2-4</b>									
<b>ALTO</b>	48,9	49,3	48,6	48,9	2320,5	1360,5	2325,4	2,405	
<b>ANCHO</b>	50,6	49,8	49,7	50,0					
<b>2-5</b>									
<b>ALTO</b>	48,6	48,9	48,8	48,8	2386,6	1402,9	2390,6	2,416	
<b>ANCHO</b>	51,5	51,2	50,9	51,2					

**MEZCLA CON BETÓN B 50/70 (1)**

<b>Probeta</b>	<b>H1 (mm)</b>	<b>H2 (mm)</b>	<b>H3 (mm)</b>	<b>Hm (mm)</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>Peso sumergido (g)</b>	<b>P.S.S.S (g)</b>	<b>Densidad (g/cm3)</b>	<b>Densidad Media (g/cm3)</b>
<b>1-1</b>									
<b>ALTO</b>	49,2	49,0	49,0	49,1	2249,2	1308,2	2253,3	2,380	
<b>ANCHO</b>	49,1	48,5	47,9	48,5					
<b>1-2</b>									
<b>ALTO</b>	49,1	48,7	49,3	49,0	2225,1	1293,8	2230,1	2,376	
<b>ANCHO</b>	48,2	48,3	48,4	48,3					
<b>1-3</b>									
<b>ALTO</b>	49,5	48,7	49,0	49,1	2231,6	1300,1	2236,8	2,382	2,383
<b>ANCHO</b>	48,1	48,1	48,6	48,3					
<b>1-4</b>									
<b>ALTO</b>	49,2	48,9	49,1	49,1	2257,3	1320,8	2262,5	2,397	
<b>ANCHO</b>	47,8	47,9	48,6	48,1					
<b>1-5</b>									
<b>ALTO</b>	49,1	49,2	49,9	49,4	2239,2	1303,2	2244,5	2,379	
<b>ANCHO</b>	48,2	48	48,4	48,2					

<b>2-1</b>								
<b>ALTO</b>	48,7	48,6	48,7	48,7	2367,0	1387,4	2373,8	2,400
<b>ANCHO</b>	51,0	50,9	51,8	51,2				
<b>2-2</b>								
<b>ALTO</b>	48,8	48,5	48,7	48,7	2350,5	1374,4	2355,7	2,395
<b>ANCHO</b>	51,7	51,5	50,9	51,4				
<b>2-3</b>								
<b>ALTO</b>	50,3	48,4	48,6	49,1	2356,5	1380,2	2361,6	2,401
<b>ANCHO</b>	51,1	51,0	50,9	51,0				2,402
<b>2-4</b>								
<b>ALTO</b>	48,8	48,7	48,9	48,8	2367,8	1391,5	2374,9	2,408
<b>ANCHO</b>	50,6	50,9	51,5	51,0				
<b>2-5</b>								
<b>ALTO</b>	49,0	48,9	49,0	49,0	2414,4	1415,5	2419,9	2,404
<b>ANCHO</b>	52,2	51,9	51,3	51,8				

**MEZCLA CON BETÓN BM3c**

Probeta	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm3)	Densidad Media (g/cm3)
1-1					2355,5	1379,8	2357,7	2,409	2,407
ALTO	48,3	48,6	49,8	48,9					
ANCHO	51,3	51,1	50,9	51,1					
1-2					2443,5	1431,9	2448,4	2,404	
ALTO	48,6	48,5	48,6	48,6					
ANCHO	53,0	52,6	52,5	52,7					



<b>1-3</b>									
<b>ALTO</b>	48,6	48,4	48,7	48,6	2452,8	1438,3	2459,0	2,403	
<b>ANCHO</b>	53	52,8	52,9	52,9					
<b>1-4</b>									
<b>ALTO</b>	48,5	48,6	48,8	48,6	2425,8	1421,9	2431,6	2,402	
<b>ANCHO</b>	52,3	52,8	52,3	52,5					
<b>1-5</b>									
<b>ALTO</b>	48,7	48,8	48,9	48,8	2411,9	1419,0	2416,5	2,418	
<b>ANCHO</b>	51,8	51,5	51,5	51,6					
<b>2-1</b>									
<b>ALTO</b>	48,8	48,8	48,9	48,8	2348,6	1369,1	2352,7	2,388	
<b>ANCHO</b>	51,0	51,0	50,7	50,9					
<b>2-2</b>									
<b>ALTO</b>	49,3	48,9	48,8	49,0	2361,6	1375,9	2366,8	2,383	
<b>ANCHO</b>	50,9	50,9	51,3	51,0					
<b>2-3</b>									
<b>ALTO</b>	49,4	49,1	48,9	49,1	2362,7	1375,4	2369,8	2,376	2,387
<b>ANCHO</b>	51,3	51,1	51,2	51,2					
<b>2-4</b>									
<b>ALTO</b>	49,2	49,3	48,6	49,0	2344,0	1365,4	2348,4	2,385	
<b>ANCHO</b>	50,1	50,8	51,3	50,7					
<b>2-5</b>									
<b>ALTO</b>	49,2	49,0	48,9	49,0	2385,9	1398,0	2390,1	2,405	
<b>ANCHO</b>	51,0	51,0	51,6	51,2					

**MEZCLA CON BETÚN BC 35/50**

Probeta	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm3)	Densidad Media (g/cm3)
1-1					2331,1	1356,4	2336,9	2,377	2,382
ALTO	48,7	48,6	49,1	48,8					
ANCHO	51,1	51,0	51,0	51,0					
1-2					2361,4	1374,5	2364,6	2,385	
ALTO	48,8	49,2	49,1	49,0					
ANCHO	51,6	51,0	51,2	51,3					
1-3					2377,4	1386,5	2382,2	2,388	
ALTO	49,0	49,0	49,1	49,0					
ANCHO	52	51,4	51,1	51,5					
1-4					2365,7	1377,0	2371,3	2,379	
ALTO	50,6	49,2	50	49,9					
ANCHO	51,3	51,3	51,2	51,3					
1-5					2372,3	1381,5	2378,4	2,380	
ALTO	49,3	49,2	49,6	49,4					
ANCHO	51	51,1	51,1	51,1					
2-1					2356,9	1369,4	2362,6	2,373	
ALTO	49,3	49,5	49,3	49,4					
ANCHO	51,1	51,0	51,0	51,0					
2-2					2366,7	1373,4	2373,1	2,367	
ALTO	49,2	49,2	49,2	49,2					
ANCHO	51,5	51,3	51,9	51,6					
2-3					2370,4	1373,3	2380,4	2,354	
ALTO	49,2	49,3	49,6	49,4					
ANCHO	51,7	51,1	51,7	51,5					
2-4									

<b>ALTO</b>	49,1	49,7	49,4	49,4	2343,3	1358,6	2351,1	2,361
<b>ANCHO</b>	51,4	50,6	50,4	50,8				
<b>2-5</b>								
<b>ALTO</b>	49,1	49,2	49,2	49,2	2370,6	1381,4	2376,2	2,383
<b>ANCHO</b>	51,5	51,0	50,7	51,1				



## **ANEJO 5: ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS**

### ***DENSIDADES Y CONTENIDO DE HUECOS***

En el presente anejo se presentan los valores de las densidades y huecos de cada una de las placas y de las probetas fabricadas en el laboratorio de Caminos de la ETSECCPB.

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

### PLACA DE LA MEZCLA CON BETÚN B 50/70 (2)

Betún B 50/70 (2)			
REFERENCIA		1	2
Densidad		2,481	2,392
%PM	Betún (b)	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95
D	Aparente (f)	2,481	2,392
	P.e.áridos	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	99,419	95,853
%H	Mezcla (100-z)	0,6	4,1
Promedio Densidad (g/cm3)			2,437
Promedio % huecos			2,4
Desviación típica			0,06293
Coeficiente de variación			2,5828

### PLACA DE LA MEZCLA CON BETÚN B 50/70 (1)

Betún B 50/70 (1)			
REFERENCIA		1	2
Densidad		2,382	2,393
%PM	Betún (b)	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95
D	Aparente (f)	2,382	2,393
	P.e.áridos	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,452	95,893
%H	Mezcla (100-z)	4,5	4,1
Promedio Densidad (g/cm3)			2,388
Promedio % huecos			4,3
Desviación típica			0,00778
Coeficiente de variación			0,3258

## CÁLCULO DE DENSIDADES Y HUECOS

### PLACA DE LA MEZCLA CON BETÚN BM3c

Betún BM3c			
REFERENCIA		1	2
Densidad		2,406	2,386
%PM	Betún (b)	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95
D	Aparente (f)	2,406	2,386
	P.e.áridos	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	96,414	95,612
%H	Mezcla (100-z)	3,6	4,4
Promedio Densidad (g/cm3)			2,396
Promedio % huecos			4,0
Desviación típica			0,01414
Coeficiente de variación			0,5902

### PLACA DE LA MEZCLA CON BETÚN BC 35/50

Betún BC 35/50			
REFERENCIA		1	2
Densidad		2,377	2,372
%PM	Betún (b)	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95
D	Aparente (f)	2,377	2,372
	P.e.áridos	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,252	95,051
%H	Mezcla (100-z)	4,7	4,9
Promedio Densidad (g/cm3)			2,375
Promedio % huecos			4,8
Desviación típica			0,00354
Coeficiente de variación			0,1489

### MEZCLA CON BETÚN B 50/70 (2)

		Betún B 50/70 (2)									
REFERENCIA		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Densidad		2,390	2,382	2,383	2,384	2,392	2,401	2,384	2,403	2,405	2,416
%PM	Betún (b)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
D	Aparente (f)	2,390	2,382	2,383	2,384	2,392	2,401	2,384	2,403	2,405	2,416
	P.e.áridos	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,772	95,452	95,492	95,532	95,853	96,213	95,532	96,293	96,374	96,814
%H	Mezcla (100-z)	4,2	4,5	4,5	4,5	4,1	3,8	4,5	3,7	3,6	3,2
Promedio Densidad (g/cm3)											2,394
Promedio % huecos											4,1
Desviación típica											0,01164
Coeficiente de variación											0,4863



### MEZCLA CON BETÚN B 50/70 (1)

		Betún B 50/70 (1)									
REFERENCIA		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Densidad		2,380	2,376	2,382	2,397	2,379	2,400	2,395	2,401	2,408	2,404
%PM	Betún (b)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
D	Aparente (f)	2,380	2,376	2,382	2,397	2,379	2,400	2,395	2,401	2,408	2,404
	P.e.áridos	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,372	95,211	95,452	96,053	95,332	96,173	95,973	96,213	96,494	96,333
%H	Mezcla (100-z)	4,6	4,8	4,5	3,9	4,7	3,8	4,0	3,8	3,5	3,7
Promedio Densidad (g/cm3)											2,392
Promedio % huecos											4,1
Desviación típica											0,01177
Coeficiente de variación											0,4922

## MEZCLA CON BETÚN BM3c

		Betún BM3c									
REFERENCIA		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Densidad		2,409	2,404	2,403	2,402	2,418	2,388	2,383	2,376	2,385	2,405
%PM	Betún (b)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
D	Aparente (f)	2,409	2,404	2,403	2,402	2,418	2,388	2,383	2,376	2,385	2,405
	P.e.áridos	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	96,534	96,333	96,293	96,253	96,894	95,692	95,492	95,211	95,572	96,374
%H	Mezcla (100-z)	3,5	3,7	3,7	3,7	3,1	4,3	4,5	4,8	4,4	3,6
Promedio Densidad (g/cm3)											2,3973
Promedio % huecos											3,9
Desviación típica											0,01342
Coeficiente de variación											0,5597

		Betún BC 35/50									
REFERENCIA		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Densidad		2,377	2,385	2,388	2,379	2,380	2,373	2,367	2,354	2,361	2,383
%PM	Betún (b)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Aridos (r=100-b)	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
D	Aparente (f)	2,377	2,385	2,388	2,379	2,380	2,373	2,367	2,354	2,361	2,383
	P.e.áridos	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975	2,6975
	P.e.betún	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	r/P.e.áridos (v)	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218	35,218
	b/P.e.betún (q)	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854	4,854
	v+q (s)	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072	40,072
	100/s (g)	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495	2,495
V	100*f/g (z)	95,252	95,572	95,692	95,332	95,372	95,091	94,851	94,330	94,610	95,492
%H	Mezcla (100-z)	4,7	4,4	4,3	4,7	4,6	4,9	5,1	5,7	5,4	4,5
Promedio Densidad (g/cm3)											2,375
Promedio % huecos											4,8
Desviación típica											0,01097
Coeficiente de variación											0,462